

Universidad de Oriente
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Telecomunicaciones



TRABAJO DE DIPLOMA

**Sistema De Control Para El Proceso De
Obtención “In Situ” De Hipoclorito De Sodio.**

Autor: Adrian Brugal Meléndez

Tutor: Ing. Rubén Cobo Alea

Santiago de Cuba

Junio, 2015

Universidad de Oriente
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Telecomunicaciones



TRABAJO DE DIPLOMA

**Sistema De Control Para El Proceso De
Obtención “In Situ” De Hipoclorito De Sodio.**

Autor: Adrian Brugal Meléndez

adrian.brugal@tle.fie.uo.edu.cu

Tutor: Ing. Rubén Cobo Alea

coboruben87@fie.uo.edu.cu

Santiago de Cuba

Junio, 2015



COMPROMISO DEL AUTOR

Hago constar que el presente trabajo de diploma es de mi autoría exclusivamente, no constituyendo copia de ningún trabajo realizado anteriormente y las fuentes usadas para la realización del trabajo se encuentran referidas en la bibliografía. Doy mi consentimiento a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización del Tutor o Institución.

Firma del Autor

PENSAMIENTO

“Si una persona es perseverante, aunque sea dura de entendimiento se hará inteligente; y aunque sea débil se transformará en fuerte.”

Leonardo da Vinci

DEDICATORIA

A toda mi familia, en especial a mis abuelos, mis tíos, mi madre y mi hermana.

AGRADECIMIENTOS

A mi abuelos Juan y Ana por estar siempre conmigo y soportar todas mis malacrianzas.

A mi madre por darme la vida y apoyo incondicional en todo momento.

A mi tío Juancito por el ejemplo que es y ayudarme en todo lo que necesito.

A mi tía Milenis que considero mi segunda madre, por su educación y dedicación.

A mi hermana Claudia por su preocupación, y cariño.

A Aramis por su educación, ayuda y ejemplo como profesional.

A mi padre, mi hermano, mis abuelos Silvia y Gilberto.

A Olguita por su paciencia y comprensión, por los momentos amargos y dulces que hemos vivido.

A Isabel por los consejos y el apoyo en las duras noches y madrugadas de trabajo.

A todos mis amigos, los del barrio y los de siempre. Que este trabajo les sirva como ejemplo de sacrificio y consagración.

A mi amigo Alejandro Chales por ayudarme y aconsejarme en torno a la elaboración de este proyecto.

A mi amigo Mayuran por compartir experiencias en el trabajo con el microcontrolador MSP430G2553 y por darme la mano cuando lo necesitaba.

A mi tutor Rubén Cobo por brindarme apoyo, por su guía y dirección.

A todos los que me ayudaron de una forma u otra a realizar este trabajo muchas gracias.

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza el diseño de un sistema de control para el proceso de obtención de Hipoclorito de Sodio que tiene lugar en una celda electrolítica diseñada y patentada por el Departamento de Telecomunicaciones de la Universidad de Oriente. Las variables que se controlan en el proceso son la temperatura y la cantidad de corriente total aplicada a los electrodos de la celda. Se realiza un estudio de las características principales de los microcontroladores MSP430, mostrando sus principales módulos, ventajas y desventajas. Se describe la celda electrolítica y se brindan además fundamentos teóricos relacionados con la electroquímica del proceso. Por último se expone el diseño del sistema propuesto, así como los elementos utilizados en la implementación del mismo.

Palabras clave: Microcontroladores MSP430, Control de proceso, Hipoclorito de Sodio.

ABSTRACT

In this work takes place the design of a control system for the process of obtaining sodium hypochlorite which takes place in an electrolytic cell designed and patented by the Department of Telecommunications at the University of Orient. The variables in the process that are controlled are the temperature and the total amount of current applied to the electrodes of the cell. A study of the main features of the MSP430 microcontroller is performed, showing its principal modules, advantages and disadvantages. Also is described the electrolytic cell and theoretical foundations related with the electrochemical process. Finally is exposed the design the proposed system and the elements used in its implementation.

Keywords: Microcontrollers MSP430, Process Control, Sodium Hypochlorite.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 1 . FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	3
1.1 Electroquímica	3
1.1.1 Celda electrolítica.....	3
1.1.2 Proceso de electrólisis	4
1.1.3 Leyes de Faraday de la Electrólisis	5
1.2 Proceso de obtención de Hipoclorito de Sodio	6
1.2.1 Descripción de la celda electrolítica.....	7
1.2.2 Algoritmo del proceso	7
1.3 Sistemas de Control de Procesos.....	8
1.3.1 Clasificación de los Sistemas de Control	9
1.3.2 Elementos de un Sistema de Control.....	10
1.4 Sistemas generadores de Hipoclorito de Sodio en el mercado	11
1.4.1 Sistemas Clorid Eco – X0.....	11
CAPITULO 2 . MICROCONTROLADORES MSP430.....	12
2.1 Tipos de encapsulado	13
2.2 Generaciones de microcontroladores MSP430.....	13
2.2.1 Serie MSP430x1xx.....	14
2.2.2 Serie MSP430x2xx.....	14
2.2.3 Serie MSP430x3xx.....	14
2.2.4 Serie MSP430x4xx.....	14
2.2.5 Serie MSP430x5xx.....	14
2.2.6 Serie MSP430x6xx.....	14
2.3 Nomenclatura	15
2.4 Aplicaciones del MSP430.....	16
2.5 Características generales	16
2.6 Entorno Gráfico de Programación	17
2.7 Plataformas de desarrollo.....	17
2.7.1 LaunchPad MSP-EXP430G2	18
2.8 Microcontrolador MSP430G2553.....	18

2.8.1	CPU	20
2.8.2	Memoria Flash	22
2.8.3	Memoria RAM	23
2.8.4	Sistema de Reloj	23
2.8.5	Circuito <i>Brownout Reset</i> (BOR).....	25
2.8.6	Sistema Supervisor de Voltaje (SVS).....	25
2.8.7	Modos de operación	25
2.8.8	Interrupciones	26
2.8.9	Puertos de entrada/salida de propósito general.....	28
2.8.10	Convertor Analógico – Digital.....	29
2.8.11	Módulos de comunicación.....	31
CAPITULO 3 . DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA.....		33
3.1	Consideraciones del diseño	33
3.2	Propuesta del sistema	33
3.3	Diseño eléctrico del sistema.....	36
3.3.1	Etapas de adquisición de datos.....	37
3.3.2	Errores en la medición.....	42
3.3.3	Visualización	44
3.3.4	Botones	46
3.3.5	Transmisión y recepción de datos	47
3.3.6	Estándar RS – 232	49
3.3.7	Circuito de fuerza	52
3.3.8	Fuente de alimentación.....	53
3.3.9	Diagrama de flujo del software (firmware).....	54
3.3.10	Configuración de terminales del microcontrolador.....	56
3.4	Configuración interna del microcontrolador.....	56
3.4.1	Configuración del Sistema de Reloj.....	56
3.4.2	Configuración de los puertos P1 y P2	57
3.4.3	Configuración del Timer0_A3.....	58
3.4.4	Configuración del Timer1_A3.....	59
3.4.5	Configuración del convertor Analógico – Digital.....	59

3.4.6	Configuración del módulo UART	60
3.5	Diseño del circuito impreso	61
3.6	Montaje del Controlador Digital v1.0	63
3.7	Manual de Usuario	64
3.8	Software para la adquisición de datos	67
3.9	Valoración económica.....	69
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		71
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		73
GLOSARIO DE TÉRMINOS		74
ANEXOS		75

INTRODUCCIÓN

Hoy en día nuestra sociedad es vulnerable a varias enfermedades parasitarias e infecciosas causadas por microorganismos como las bacterias, hongos, protozoos y virus. Una de las principales causas de esta situación es la contaminación del agua que se consume.

Generalmente, las aguas naturales contienen numerosos gérmenes, de los cuales algunos pueden ser patógenos. Estos gérmenes suelen estar en el suelo o en las aguas contaminadas con heces de personas o animales. De este modo, el agua se convierte en un vehículo de transmisión de enfermedades como el cólera, la tifoidea, paratifoidea, hepatitis, disentería amebiana y viral, entre otras [1].

La desinfección del agua para el consumo humano mediante la aplicación de cloro o sus derivados, es un proceso aceptado en todo el mundo para suministrar agua de buena calidad bacteriológica [1].

En nuestro país se emplea el Hipoclorito de Sodio como agente oxidante en el proceso de purificación del agua. Este compuesto químico también tiene uso en la industria como bloqueador de fibras textiles y desinfectante de piscinas. Debido al alto nivel de demanda del hipoclorito de sodio el país necesita una vía soluble y económica que le permita el abastecimiento periódico del mismo.

La producción del desinfectante por medio de procesos electroquímicos, es una alternativa que cada día tiene mayor aceptación [1]. En la actualidad se puede obtener Hipoclorito de Sodio sin recurrir a medios o lugares especiales mediante procesos de electrólisis, que tiene lugar en celdas electroquímicas, esto define un proceso de bajo costo, simple y confiable.

En dicho proceso se deben controlar variables como temperatura y carga aplicada a los electrodos de la celda electrolítica, de no ser así el proceso electrolítico se haría reversible y no se obtendría un producto de calidad.

Antecedentes del problema

En el departamento de Telecomunicaciones de la Universidad de Oriente se diseñó y patentó una celda electrolítica para la obtención *in situ* de Hipoclorito de Sodio mediante un proceso de electrólisis, pero esta no dispone de un sistema que permita controlar la temperatura y la carga total aplicada a la celda. Si se logra mantener dicho proceso a temperaturas menores de 35° C es posible obtener un producto de mayor calidad y concentración, por tanto se puede hacer más eficiente la tecnología.

Problema a resolver

Inexistencia de un control adecuado para el proceso de obtención *in situ* de Hipoclorito de Sodio mediante electrólisis.

Objeto de estudio

Sistema de control para el proceso de obtención de Hipoclorito de Sodio.

Campo de acción

Sistema de control para el proceso de obtención de Hipoclorito de Sodio con microcontroladores.

Objetivo Principal

Diseñar e implementar un sistema de control para el proceso de obtención *in situ* de Hipoclorito de Sodio.

Objetivos Específicos

- Estudiar los fundamentos teóricos del proceso de electrólisis para la obtención de Hipoclorito de Sodio.
- Caracterizar la celda electroquímica.
- Realizar un estudio detallado acerca de los microcontroladores MSP430
- Diseñar el sistema de control basado en el microcontrolador MSP430G2553.
- Implementar el prototipo.
- Diseñar un software en LabWindows que permita capturar los datos del sistema desde un ordenador.

CAPITULO 1 . FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Los avances de la electrónica y las telecomunicaciones en nuestros días han llevado a planos superiores el desarrollo de sistemas de control para llevar a cabo disímiles tareas en todos los sectores de la industria. La aparición de los microcontroladores y la alta integración de circuitos representan los elementos principales de esta evolución.

En este capítulo se encuentran los fundamentos relacionados y necesarios para el desarrollo del proyecto. Se presentan los conceptos y aspectos fundamentales de la electroquímica, se caracterizan los elementos de proceso en cuestión así como la celda electrolítica; por último se realiza un breve estudio acerca de los sistemas de control de procesos.

1.1 Electroquímica

Es una rama de la química que estudia la transformación entre la energía eléctrica y la energía química [2]. Se ocupa de la relación existente entre los fenómenos químicos y la electricidad [3]. Abarca todas las reacciones químicas en donde intervienen dos elementos: electrodos y electrólito. Los primeros pueden ser conductores o semiconductores, los cuales presentan polaridad (ánodo y cátodo); el segundo es un conductor iónico, generalmente una disolución. Si dicha reacción es concebida con una diferencia de potencial externo se le conoce como electrólisis; por otra parte si la reacción trae como consecuencia una diferencia de potencial se le conoce como celda galvánica o acumulador de energía.

1.1.1 Celda electrolítica

Todas las reacciones electroquímicas comprenden la transferencia de electrones y, por lo tanto, son reacciones de óxido-reducción. Los sitios de oxidación y reducción están separados físicamente, por un ánodo y un cátodo respectivamente. El sistema de aplicación se basa principalmente en una celda y una corriente de entrada y de salida por los electrodos. Las celdas electroquímicas se clasifican en 2 tipos:

- Las celdas electrolíticas: aquellas en las que la energía eléctrica de una fuente externa hace que ocurran reacciones químicas no espontáneas.
- Las celdas voltaicas: aquellas en las que las reacciones químicas, espontáneas, generan electricidad y la suministran a un circuito externo [4].

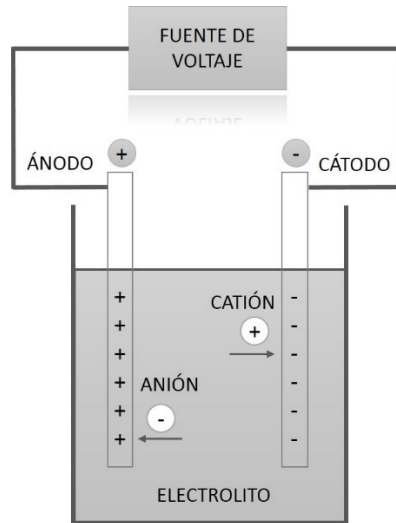


Fig. 1.1. Celda electrolítica (Fuente: [5]).

1.1.2 Proceso de electrólisis

La descomposición que experimentan los conductores electrolíticos, cuando a través de ellos pasa una corriente eléctrica recibe el nombre de electrólisis [3]. El proceso de electrólisis se caracteriza por ser un fenómeno de reducción-oxidación no espontáneo producido por una corriente eléctrica. La reducción se lleva a efecto en el polo negativo (cátodo) y la oxidación en el polo positivo (ánodo). La cantidad de producto que se forma durante el proceso de electrólisis depende de 2 factores fundamentales: cantidad de electricidad que circula a través de la celda electrolítica y masa equivalente de la sustancia que forma el electrolito. Esta cantidad de corriente eléctrica o carga se determina hallando el producto de la intensidad de la corriente en amperios por el tiempo transcurrido, en segundos.

$$Q_{A/S} = i_A \times t_S \quad (1.1)$$

$Q_{A/S}$: Carga eléctrica

i_A : Intensidad de corriente

t_S : Tiempo transcurrido

La mayoría de los compuestos inorgánicos y algunos de los orgánicos se ionizan al fundirse o cuando se disuelven en agua u otros líquidos; es decir, sus moléculas se disocian en especies químicas cargadas positiva y negativamente que tienen la propiedad de conducir la corriente eléctrica. Si se coloca un par de electrodos en una disolución de un electrolito y se conecta una fuente de corriente continua entre ellos, los iones positivos de la disolución se mueven hacia el electrodo negativo y los iones negativos hacia el positivo. Al llegar a los electrodos, los iones pueden ganar o perder electrones y transformarse en átomos neutros o moléculas; la naturaleza de las reacciones del electrodo depende de la diferencia de potencial aplicada [4].

1.1.3 Leyes de Faraday de la Electrólisis

Faraday descubrió por vía experimental las relaciones entre la cantidad de electricidad que pasa a través de una disolución electrolítica y las cantidades de sustancias depositadas o liberadas en los electrodos; sus resultados pueden resumirse en los dos enunciados siguientes:

- La masa de una sustancia asociada a una reacción de electrodo cualquiera es proporcional a la cantidad de electricidad que pasa por el electrodo.
- Las masas de sustancias diferentes asociadas a dos o más reacciones de electrodo, por el paso de una misma cantidad de electricidad son proporcionales a sus equivalentes químicos [3].

La ecuación (1.2) resume ambas leyes.

$$w = \frac{It}{F} \times \frac{M}{z} \tag{1.2}$$

w : masa en gramos asociada a la reacción de electrodo

I : corriente en amperes

t : tiempo en segundos

M : peso molecular de la sustancia asociada

z : número de electrones que toman parte en la reacción

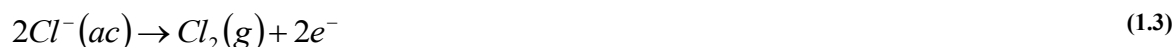
F : constante de Faraday (96484 Coulomb/mol)

Las leyes antes expuestas se aplican a disoluciones electrolíticas y electrólitos fundidos, además son independientes de temperatura, naturaleza de disolvente y presión.

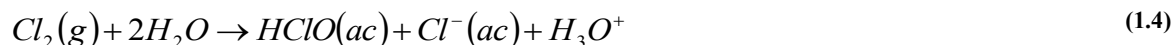
1.2 Proceso de obtención de Hipoclorito de Sodio

La producción electroquímica *in situ* de disoluciones de hipoclorito, ha sido por mucho tiempo una opción cuando no es necesario el almacenamiento de hipoclorito por largos períodos de tiempo.

Las disoluciones de hipoclorito con un contenido de cloro activo de 10 g/L generalmente se producen *in situ* en las celdas electroquímicas, usando salmueras (NaCl) preparadas o con el agua de mar natural. La electrólisis de cloruro de sodio produce cloro en el ánodo:



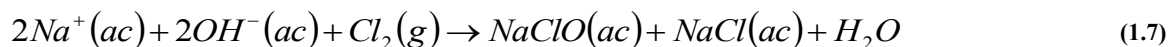
El producto final depende de las condiciones operacionales de la celda. La hidrólisis del cloro y la disociación del ácido hipocloroso forman hipoclorito y cloruro en la disolución:



En la electrosíntesis de hipoclorito generadas *in situ* los productos de las reacciones anódica y catódica se encuentran mezclados; los iones hidroxilos formados en el cátodo mantienen el electrólito cerca de la neutralidad. En estas condiciones, la concentración de cloro disuelto cerca de la superficie del ánodo permanece lo suficientemente baja, permitiendo así la evolución del cloro gaseoso y dejando el hipoclorito como producto principal.



Los iones OH^- salen del área catódica y se combinan con Na^+ y Cl_2 hacia el ánodo, produciendo la solución de hipoclorito de sodio, cuyo resultado químico se resume en:



1.2.1 Descripción de la celda electrolítica

La celda electrolítica cuenta con una fuente de alimentación capaz de suministrar 20 v y 10 A; el cátodo está compuesto de titanio (Ti) y el ánodo de platino (Pt) recubierto de niobio (Nb). Tiene 0,5 m de diámetro y 1 m de altura, con una capacidad efectiva de 0,40 m³ que es equivalente a 400 L.

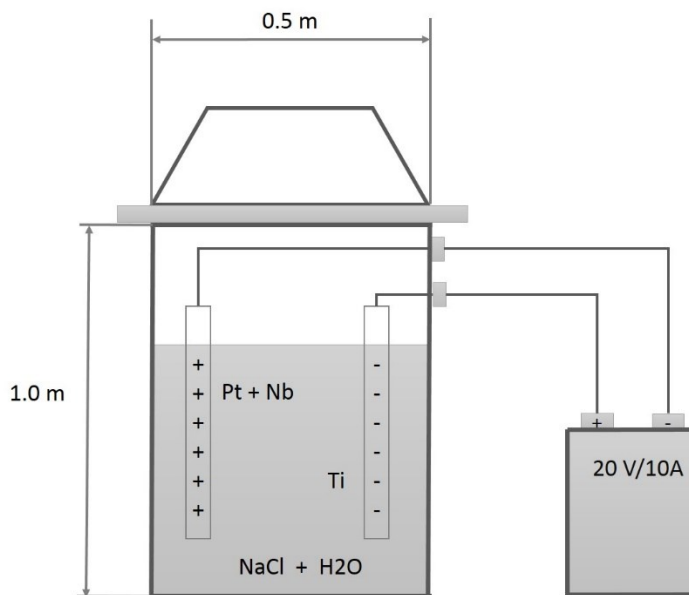


Fig. 1.2. Descripción de la celda electrolítica.

1.2.2 Algoritmo del proceso

La celda puede estar energizada siempre y cuando la temperatura interior no exceda los 35 °C, el tiempo transcurrido en que los electrodos están conectados a la alimentación debe ser supervisado, para determinar junto con la intensidad de corriente la carga parcial suministrada a la celda en cada intervalo de tiempo (ecuación 1.8); hasta llegar a una

carga total predefinida tal como se plantea en la ecuación (1.1), de esta forma se alcanza la etapa final del proceso.

$$Q_i = i_A \times t_i \tag{1.8}$$

Q_i : Carga eléctrica parcial

i_A : Intensidad de corriente

t_i : Tiempo parcial

En la Figura 1.3 se muestra un esquema en bloques que describe de forma más detallada el algoritmo del proceso.

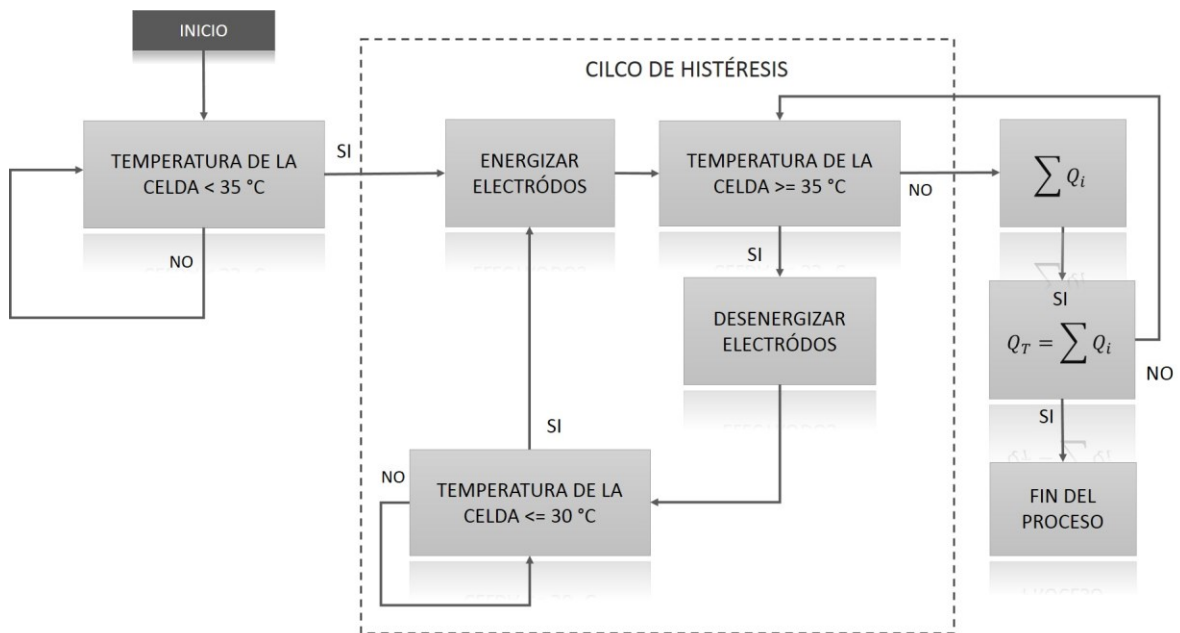


Fig. 1.3. Esquema en bloques del algoritmo del proceso.

1.3 Sistemas de Control de Procesos

Los sistemas de control se encuentran en gran cantidad en todos los sectores de la industria [5], en su gran mayoría, las actividades cotidianas están afectadas por algún tipo de sistema de control.

Un proceso es un conjunto de operaciones simultáneas o secuenciales que producen transformaciones de la materia de carácter físico y/o químico [5].

Desde el punto de vista de la teoría de control, un proceso está formado por un conjunto de elementos relacionados entre sí que ofrecen señales de salida en función de señales de entrada [6].

En la mayoría de los procesos existen cientos de variables que se deben mantener en algún valor determinado [7]. Para controlar dichas variables se necesitaría un elevado número de operarios, una forma óptima para resolver este problema sería la realización de un control por medio de instrumentos que controlen las variables sin necesidad de que intervenga operador alguno. A grandes rasgos esto es lo que significa el control automático de procesos cuyo único objetivo es mantener en determinado valor las variables del proceso.

1.3.1 Clasificación de los Sistemas de Control

Los sistemas de control se clasifican en sistemas de lazo abierto y a lazo cerrado. En un sistema de control a lazo abierto, la acción de control es independiente de las variables de salida. Por otra parte en un sistema de control a lazo cerrado, la acción de control en cierto modo depende de las variables de salida.

Los sistemas de control a lazo abierto tienen dos características fundamentales:

- Su capacidad para ejecutar una acción con exactitud está relacionada con una previa calibración.
- No presentan los problemas de la inestabilidad, que afectan a los sistemas de lazo cerrado.

Los sistemas de control a lazo cerrado brindan tres características principales:

- Poseen una mayor exactitud que los sistemas de lazo abierto.
- Afectados por efectos reducidos de no linealidad y distorsión.
- Presentan problemas de inestabilidad.

En la Figura 1.4 se muestra un diagrama en bloque de un sistema de control básico, donde se incluyen el control realimentado (lazo cerrado) y prealimentado (lazo abierto).

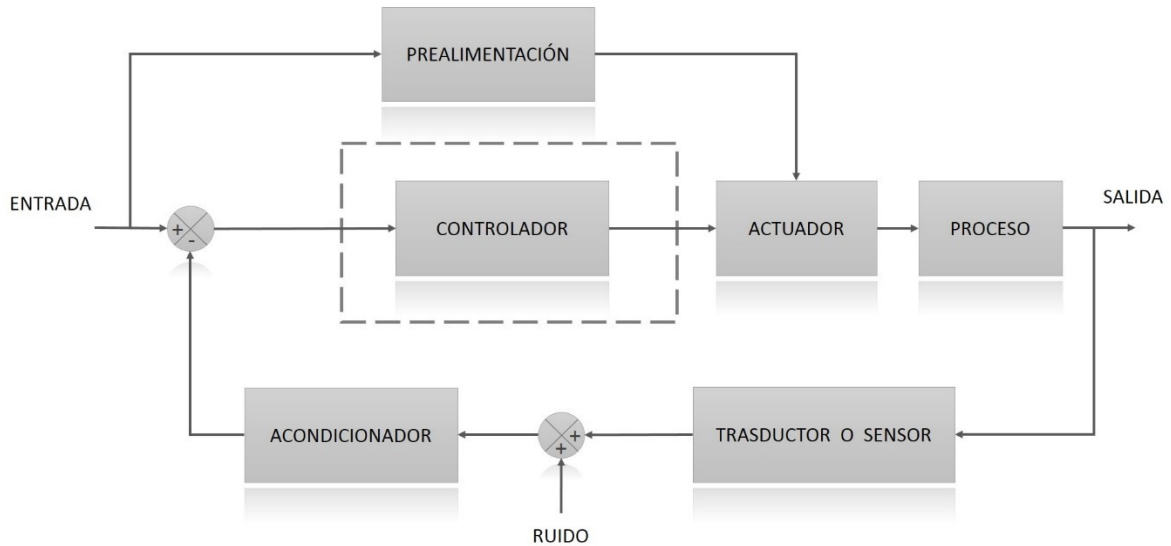


Fig. 1.4. Diagrama en bloques de un sistema de control básico.

1.3.2 Elementos de un Sistema de Control

Los sistemas de control como se puede apreciar en la figura anterior cuentan con una serie de elementos

- Instrumentos de medida o sensores: Son los elementos encargados de medir las variables controladas. Representan la principal fuente de información referente al proceso.
- Transductores: Elementos del sistema de control que convierten magnitudes físicas que no pueden ser utilizadas por el sistema de control en otras que sí lo pueden ser, como por ejemplo una corriente eléctrica [8].
- Líneas de transmisión: Llevan la señal desde el sensor al controlador y del controlador al elemento final de control. Frecuentemente se debe amplificar la señal del sensor antes de transmitirla [8].
- Controlador: Pueden ser analógicos o digitales. Se encarga del procesamiento de las señales entregadas por los sensores y la generación de las señales de control correspondientes.
- Actuador: Es el dispositivo físico que lleva a cabo la decisión del controlador [8].
- Registradores: Representan el soporte visual y el registro histórico del funcionamiento del sistema.

- Sistema de transmisión: Permite transmitir la información procesada por el controlador a distancia, en caso de que sea necesario.

1.4 Sistemas generadores de Hipoclorito de Sodio en el mercado

Según una amplia búsqueda bibliográfica, en el mercado existen tres sistemas para la generación “in situ” de hipoclorito de sodio. A continuación se relacionan cada uno de ellos y se exponen sus características principales.

1.4.1 Sistemas Clorid Eco – X0

Estos sistemas están diseñados para producir una solución de Hipoclorito de Sodio por electrólisis de salmuera, esta se prepara en un tanque de producción PVC y es disuelta para formar una acuosa. Cuenta además con electrodos conectados en paralelo y energizados con corriente continua. Las unidades son: Clorid Eco – 30, Clorid Eco – 60, Clorid Eco – 90.

Tabla 1.1. Características de los sistemas Clorid Eco - X0

Características	Clorid Eco - 30	Clorid Eco - 60	Clorid Eco - 90
Producción	300 g/8 horas	600 g/8 horas	900 g/8 horas
Fuente de DC	5.2 V / 3 A	5.2 V / 3 A	5.2 V / 3 A
Temperatura	45 °C	45 °C	45 °C
Instalación	Albergada	Albergada	Albergada
Consumo	90 W/h	180 W/h	360 W/h
Alimentación de electrodos	5.2 V / 16 A	5.2 V / 16 A	5.2 V / 16 A

CAPITULO 2 . MICROCONTROLADORES MSP430

La electrónica en nuestros días ha avanzado a pasos agigantados, y con ella el desarrollo de dispositivos que permiten realizar tareas de cualquier clase; actualmente existen dos elementos muy utilizados: los microprocesadores y los microcontroladores.

Los microprocesadores son dispositivos que se pueden configurar de acuerdo a las necesidades del usuario, poseen más instrucciones y más capacidad que los microcontroladores, generalmente estos dispositivos se utilizan en proyectos donde se requiere un alto procesamiento de datos.

Los microcontroladores son dispositivos de menor capacidad; sus instrucciones son fáciles de manipular y presentan bajos costos en el mercado [9]. Pueden ejecutar órdenes grabadas en una memoria permitiéndoles realizar un conjunto de tareas similar al proceso empleado por lo que hoy conocemos como ordenadores personales. Se encuentran empujados en varios de los dispositivos que vemos día a día, como automóviles, semáforos, hornos microondas, TV, sistemas de audio, terminales telefónicos, sistemas de control – automatización y demás.

La gran ventaja y el poder de estos dispositivos radica en la relación tamaño – adaptabilidad; a diferencia de los circuitos tradicionales discretos, los diseños que emplean microcontroladores pueden ser programados para realizar disímiles tareas y reprogramarse para cambiar su funcionalidad dependiendo del requerimiento [10]. Representan además un ahorro notable de tiempo y costo a tomar en cuenta para el desarrollo de aplicaciones. Presentan algunas limitaciones con respecto a la velocidad de procesamiento y el tamaño de memoria. Las compañías comercializadoras ofrecen una gran variedad de dispositivos que se diferencian exactamente en estos parámetros; es trabajo del diseñador seleccionar el dispositivo adecuado que cumpla con los requerimientos necesarios para dar solución al problema.

La capacidad que ofrecen para adaptarse a múltiples tareas les permitirá mantenerse en el mercado e incrementar su utilización en años venideros.

En este capítulo se estudia la familia de micro controladores MSP430 desarrollados por la empresa norteamericana *Texas Instruments*, en especial el dispositivo MSP430G2553 que será el elemento principal en el desarrollo del sistema.

La familia de microcontroladores MSP430 de *Texas Instruments* ofrece una plataforma muy versátil para el desarrollo de diferentes aplicaciones. Esta variedad de microcontroladores se pueden encontrar en el mercado a precios relativamente bajos, poseen una arquitectura que ofrece niveles muy bajos de consumo energético, ideal para sistemas de mediciones portátiles, ya que extiende la vida útil de las baterías. Se caracterizan por poseer una CPU de 16 bit tipo RISC (*Reduce Instrucción Set Computer*), 16 registros y generadores de constantes que contribuyen a códigos de máxima eficiencia [11].

2.1 Tipos de encapsulado

Texas Instruments ha desarrollado sus dispositivos con diferentes tipos de encapsulados, variando el número de pines y tamaños según las necesidades y finalidades del microcontrolador. Los encapsulados usados son QFN, TSSOP, PDIP, DIP, SIOC, BGA.



Fig. 2.1. Encapsulados de la familia MSP430.

2.2 Generaciones de microcontroladores MSP430

La familia MSP430 es una línea de microcontroladores de ultra-bajo-consumo, que consiste en una amplia gama de dispositivos que presentan disímiles características y accesorios destinados a diferentes aplicaciones. Los dispositivos tienen gran variedad de configuraciones, velocidades de procesamiento, capacidades de direccionamiento, tamaño y tipo de memoria, periféricos, entre otras cualidades que permiten agruparlos con el principal objetivo de emplearlas en aplicaciones más específicas.

Existen seis generaciones, en orden de desarrollo se encuentran la 3xx, 1xx, 4xx, 2xx, 5xx y 6xx. Las dos primeras están limitadas a un direccionamiento de 16 bit, mientras que las restantes permiten 20 bit.

2.2.1 Serie MSP430x1xx

Es la generación básica, no cuenta con controlador LCD (*Liquid Crystal Display*). Generalmente son pequeños como la 3ra generación y cuentan un gran número de periféricos analógicos y digitales. Operan en rangos de 1.8 a 3.6 volt con memorias flash hasta 60KB, el CPU ofrecen 8 MIPS (*Millions of Instructions Per Second*).

2.2.2 Serie MSP430x2xx

Esta serie es similar a la 1ra pero ofrece menos consumo de energía. Soporta velocidades de operación hasta 16MHz, son más precisos, lo que les permite operar sin un cristal externo. Su rango de trabajo es 1.8 a 3.6 volt e incluyen un oscilador de muy bajo consumo (VLO), así como resistencias internas pull-up y pull-down.

2.2.3 Serie MSP430x3xx

Es la generación más antigua, diseñada para aplicaciones portátiles de instrumentación con controlador LCD, incluye un oscilador FLL (*Frequency Locked Loop*), que puede ser sincronizado a cristales de baja frecuencia alrededor de los 32 KHz. Esta serie no soporta memoria EEPROM, solamente ROM y EPROM. Opera en rangos de 2.5 a 5.5 volt.

2.2.4 Serie MSP430x4xx

Es similar a la serie anterior pero incluye un controlador LCD más potente, opera en un rango de 1.8 a 3.6 V y brinda 8 MIPS, incluye además un oscilador FLL y SVS, lo cual es ideal para aplicaciones médicas y de medición.

2.2.5 Serie MSP430x5xx

La 5ta generación trabaja a frecuencias de 25 MHz, incluye memoria flash máxima 256 kB y RAM de 18kB. Opera con voltajes de 1.8 a 3.6 V y brinda hasta 25 MIPS, incluye también una unidad de administración de energía e integra el bus USB.

2.2.6 Serie MSP430x6xx

Esta última generación ofrece las mismas características que la 5ta pero incorpora mejoras en los periféricos.

2.3 Nomenclatura

La nomenclatura utilizada por TI para sus dispositivos está formada por un prefijo estándar que puede ser CC para el caso de transceptores ejemplo CC2500; XMS para componentes experimentales y MSP430 para los microcontroladores. Seguido de este prefijo se encuentra una serie de números y caracteres que se explican mediante el siguiente ejemplo:

MSP430F2618ATZQWT-EP

- **MSP430:** Prefijo estándar de la compañía (*Mixed Signal Processor*)
- **F:** Indica el tipo de memoria, flash, ROM y demás, si es acompañada de otra letra indica una función especializada del dispositivo.
- **2:** Indica la generación del dispositivo, que sugiere cambios en el núcleo de los periféricos como generadores de señal de reloj, comunicación UART, entre otros. Debe tenerse en cuenta que este número no indica el orden cronológico de las generaciones, ya que este equivale a la 4ta generación.
- **6:** Ofrece el modelo dentro de la generación, indicando el número de periféricos y pines.
- **18:** Este sufijo indica el tamaño de memoria del dispositivo.
- Puede encontrarse opcionalmente seguido de este último número un dígito que comenta la adición o eliminación de algún que otro periférico.
- **A:** Este carácter indica una revisión mejorada del dispositivo.
- **T:** Indica el rango de la temperatura de trabajo en este caso -40°C a $+105^{\circ}\text{C}$.
- **ZQW:** Indica el tipo de encapsulado. *Texas Instruments* especifica este prefijo como el equivalente al encapsulado BGA (*Ball Grid Array*).
- **T:** Es opcional e indica si el dispositivo se encuentra en un carrete grande, pequeño o normal; en este caso se encuentra en un carrete pequeño.
- **EP:** Especifica una característica adicional del microcontrolador, ejemplo especializado para la automatización, dispositivo mejorado o trabajo en condiciones de temperatura extrema.

2.4 Aplicaciones del MSP430

- Mediciones.
- Equipos portátiles médicos.
- Dispositivos de registros de datos.
- Comunicaciones inalámbricas.
- Teclados capacitivos.
- Control de motores.
- Dispositivos de Seguridad.
- Equipos almacenadores de energía.

2.5 Características generales

Los MSP 430 son una familia de microcontroladores con capacidad añadida para operaciones de procesamiento analógico de complejidad simple a media. La memoria de programa varía desde 512 Bytes hasta 256 kBytes. Están diseñados en torno a un CPU de 16 bits, con arquitectura Von Newman. Para el proceso de depuración y programación utiliza una interfaz estandarizada JTAG (*Joint Test Action Group*) o una versión de JTAG llamada *Spy-Bi-Wire* que usa 2 líneas identificadas como *clock* y *bidirection data*. Las configuraciones de estos dispositivos incluyen osciladores internos, temporizadores, generadores de PWM, WDT, USART, SPI, I²C, USB, A/D de 10, 12,14, o 16 bits, D/A de hasta 12 bits, comparadores analógicos y amplificadores operacionales.

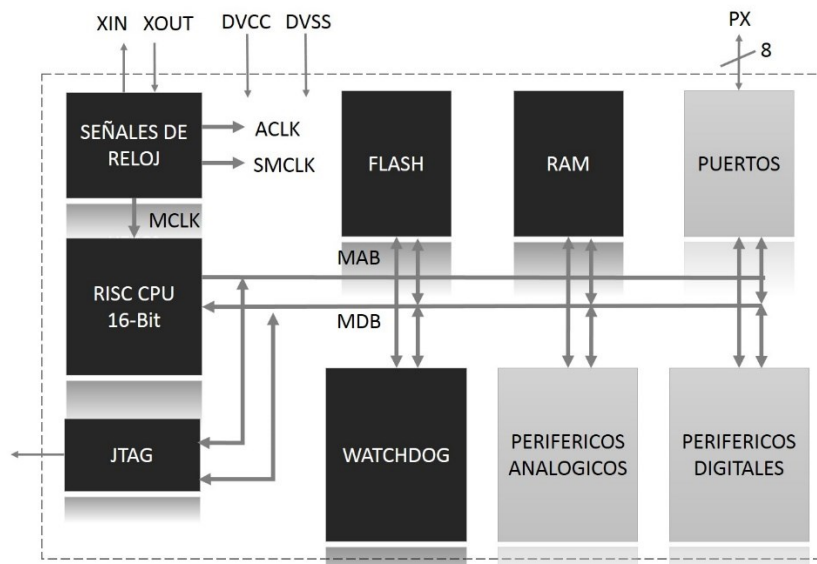


Fig. 2.2. Arquitectura general de la familia MSP430.

2.6 Entorno Gráfico de Programación

El software destinado para la compilación es el CCS (*Code Composer Studio v5*), herramienta oficial proporcionada por el fabricante. Existen otros compiladores comerciales como *IAR System Imagine Craft* y de código abierto como el caso de *Energía* que no serán tratados en este trabajo.

CCS es una suite que permite el desarrollo de aplicaciones utilizando diferentes lenguajes, se basa en el software libre *Eclipse* pero con extensiones de *Texas Instruments* para manejar los microcontroladores MSP430, incluye además un depurador, un simulador y un gestor de proyectos.

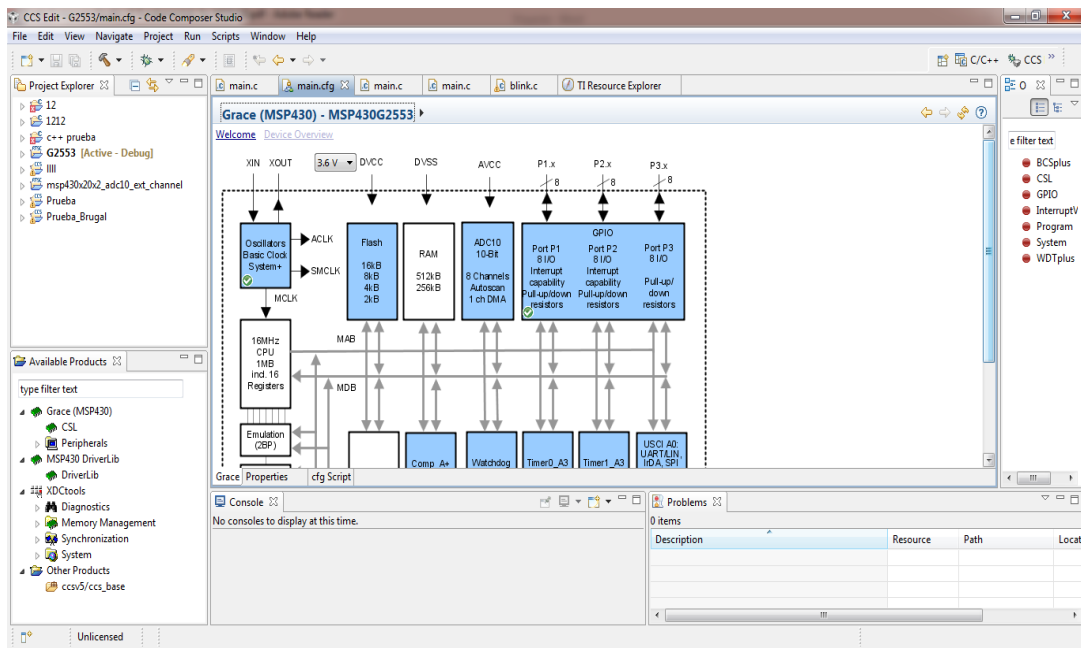


Fig. 2.3. Code Composer Studio v5.

2.7 Plataformas de desarrollo

Texas Instruments provee una serie de plataformas que permiten comprender el funcionamiento de sus microcontroladores, así como evaluar y poner en marcha las aplicaciones realizadas con el mismo. Ejemplos de plataformas de experimentación: MSP-EXP430F5438, MSP-EXP430G4618 y MSP-EXP430G2; esta última se emplea en nuestro proyecto.

2.7.1 LaunchPad MSP-EXP430G2

La tarjeta está diseñada para el trabajo con dispositivos MSP430G2xx, dispone de un socket DIP de 20 pines y una conexión USB que permite grabar y depurar programas directamente en el hardware.



Fig. 2.4. LaunchPad MSP- EXP430G2.

Tabla 2.1. Elementos del kit de desarrollo MSP- EXP430G2

Elementos	Cantidad
Led programable	2
Led de encendido	1
Botón RESET	1
Botón programable	1
Adaptador mini USB tipo B	1
Microcontrolador MSP430G2452	1
Cristal de 32 KHz	1

2.8 Microcontrolador MSP430G2553

Para el diseño del sistema se empleó el dispositivo MSP430G2553 que pertenece a la serie MSP430G2xxx; el cual brinda un conjunto de características que cumplen de forma práctica y eficiente las exigencias de la aplicación. A continuación se muestran dichas características.

- Voltaje de alimentación de bajo rango: 1.8 V a 3.6 V.
- Consumo bajo de energía.
 - Modo activo: 230 μ A a 1 MHz, 2.2 V.
 - Modo espera: 0.5 μ A.
 - Modo Apagado (*RAM Retention*): 0.1 μ A.
- 5 modos de operación.
- Regreso de modo de *Standby* en menos de 1 μ s.
- CPU de 16- Bit, arquitectura RISC, 62.5-ns tiempo de ciclo de instrucción.
- Módulo de señal de reloj.
 - Frecuencia interna de 1 MHz hasta 16 MHz.
 - Oscilador de muy baja frecuencia (LF).
 - Oscilador de cristal hasta 32 KHz.
 - Fuente de señal de reloj digital externa.
- 2 temporizadores de 16- Bit con 3 tiempos de Captura/Comparación de registros.
- Interface de Comunicación Serial Universal (USCI).
 - Codificador y decodificador del estándar IrDA.
 - Bus de datos SPI.
 - I²C.
 - UART (Transmisor-Receptor Asíncrono Universal) mejorado.
- Comparador de señales analógicas.
- Convertidor analógico – digital de 10- Bit, a 200 ksps con referencia de voltaje interna.
- Espacios de memoria.
 - Memoria Flash 16 kB.
 - Memoria RAM 512 B.
- Terminales del dispositivo.
 - Microcontrolador de 20 pines
 - 16 terminales GPIO, Interrupción configurable *pull-up/ pull-down*.
- Encapsulado PDIP.

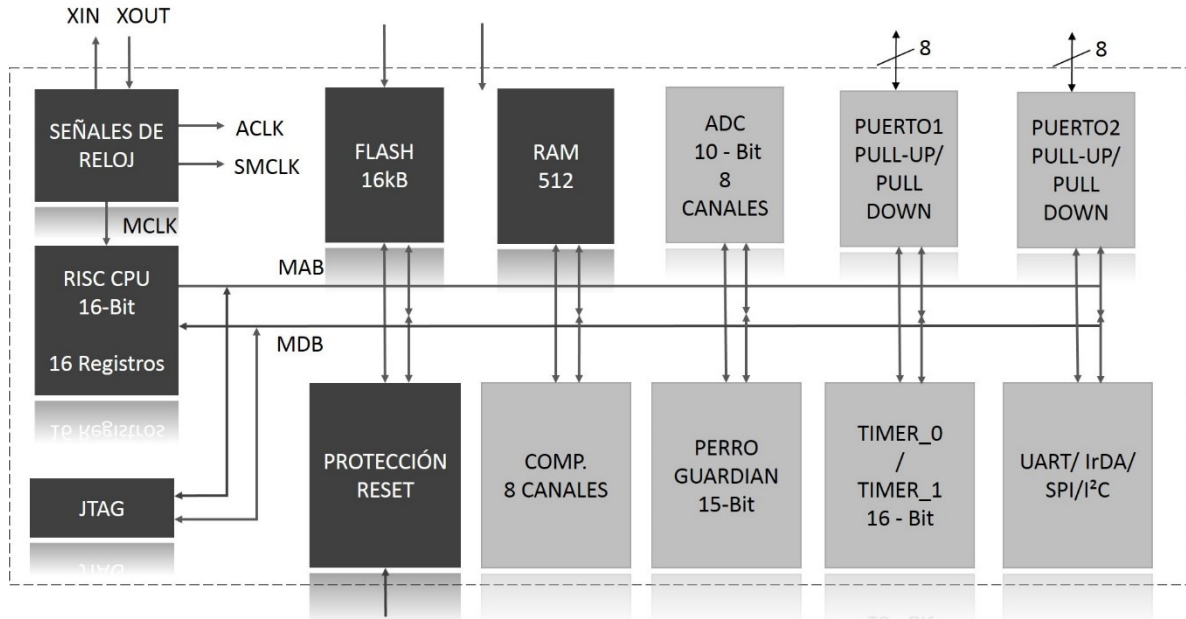


Fig. 2.5. Esquema en bloques del MSP430G2553 (Fuente: [9]).

2.8.1 CPU

Cuenta con 16 registros para la ejecución de instrucciones, estas se realizan en los registros de operación en conjunto con 7 modos de direccionamiento para la fuente y 4 modos de direccionamiento para el destino de la operación.

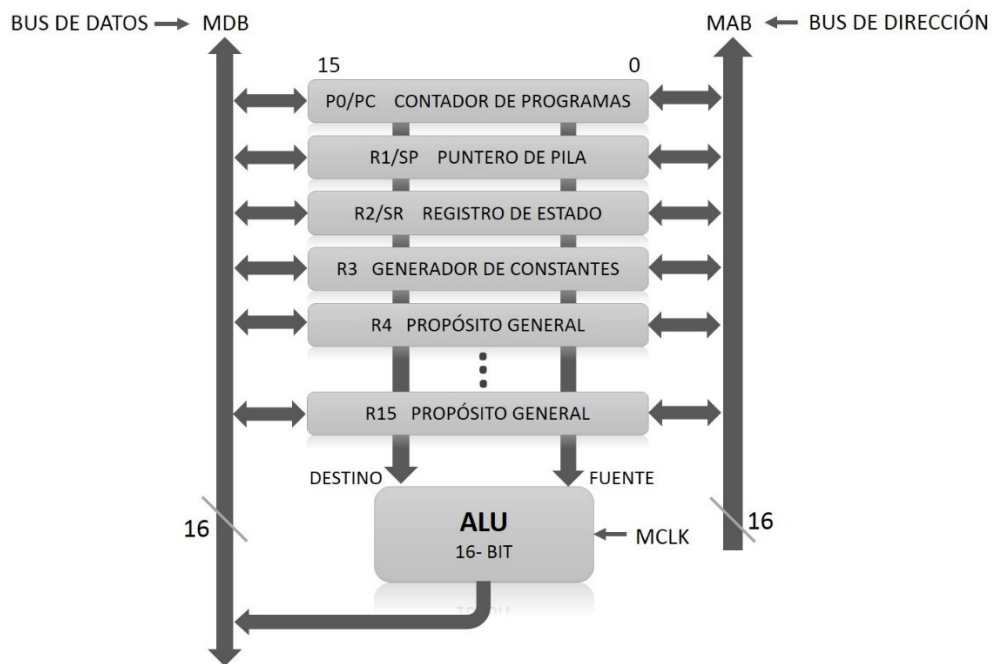


Fig. 2.6. Esquema en bloques del CPU.

2.8.1.1 Registros del CPU

Los registros R0, R1, R2 y R3 están dedicados a funciones específicas del CPU como el contador de programas, la pila, estado del sistema y el generador de constantes; los registros restantes o sea de R4 a R15 son de uso general.

- Contador de programas (PC): Este registro apunta a la siguiente instrucción que el microcontrolador va a ejecutar. Las instrucciones usan números pares para su identificación y el PC va incrementando su valor conforme a estos números.
- Puntero de Pila (SP): El SP es usado por el CPU para almacenar la dirección de la instrucción a la que se debe retornar cuando ha ocurrido una interrupción o se ha llamado a una subrutina.
- Estado de Sistema (SR): Es el registro de estado del dispositivo, los 7-bit más significativos están reservados y los otros restantes son los que se utilizan. En este registro se encuentran los bits para deshabilitar el CPU, desactivar algunas de las señales de reloj así como el bit para deshabilitar las interrupciones. En la siguiente figura se muestran más detalles del SR.

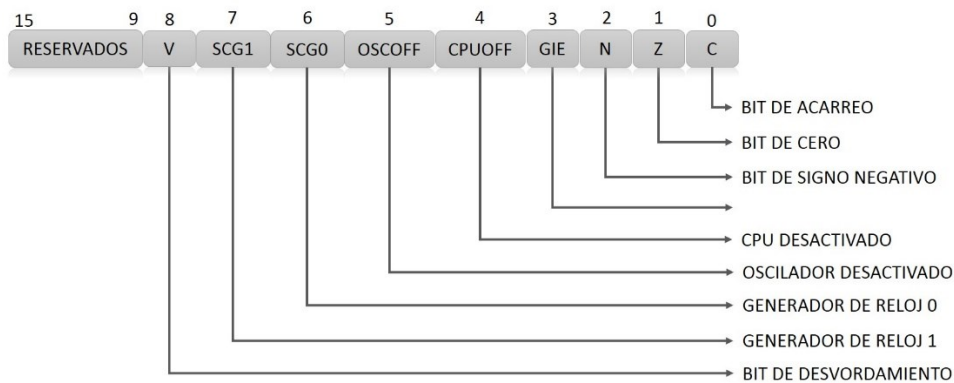


Fig. 2.7. Registro SR.

- V: Indica cuando una operación aritmética sobrepasa el valor asignado a la variable.
- SG0 y SG1: Si están activados se deshabilitan la señal de reloj SMCLK y el Oscilador interno.
- OSCOFF: Si está activado deshabilita el oscilador externo.
- GIE: Cuando está activado habilita todas las interrupciones enmascarables.
- N: Indica cuando el resultado de una operación es negativo.

Z: Indica cuando resultado de una operación es igual a 0.

C: Indica cuando el resultado de una operación produce un acarreo.

- Generador de Constantes (CG):

Este es el registro encargado de la generación de constantes, que no requiere de una palabra adicional o un código de programa. No necesita instrucciones especiales ni código de acceso a la memoria para restaurar una constante.

2.8.2 Memoria Flash

El módulo de memoria flash está integrado en el microcontrolador, se encarga del control de programación y borrado de operaciones, cuenta con 4 registros, un generador de voltajes y un sincronizador, empleados en el suministro de programas y voltajes de borrado.

2.8.2.1 Características memoria flash MSP430

- Generador de voltaje interno.
- Programación por bit, byte o palabra.
- Borrado de memoria general y por segmento.

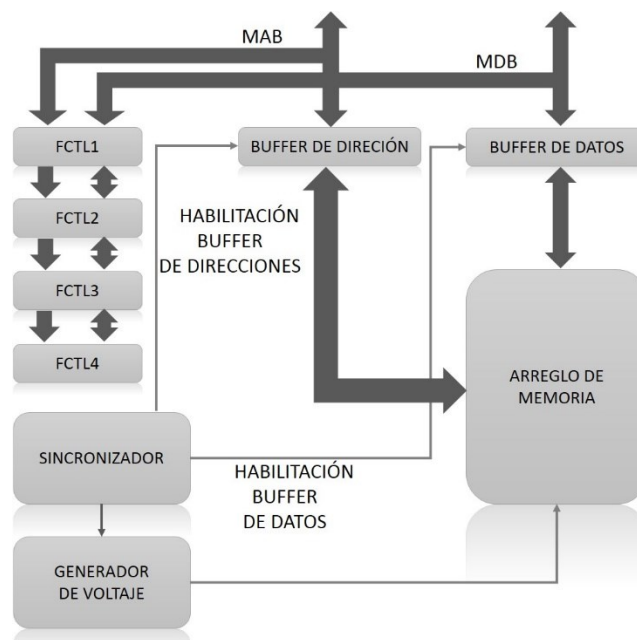


Fig. 2.8. Esquema en bloques de la Memoria Flash.

2.8.2.2 Segmentación de memoria

La memoria esta particionada en segmentos y estos a su vez por bloques; como ya se conoce se pueden escribir un bit, un byte y/o una palabra, pero el segmento es la unidad más pequeña de la memoria que puede ser borrada. A la vez la memoria está dividida en dos partes: memoria principal y memoria de Información. El código puede ser grabado en cualquier lugar de la memoria flash, la diferencia entre estas dos partes radica en el tamaño de los segmentos y la dirección física.

En el microcontrolador MSP430G2553 la memoria principal es de 16 kByte con 32 segmentos de 512 byte cada uno, por otra parte la memoria de información es de 256 byte con 4 segmentos de 64 byte cada uno (ver anexo 1).

2.8.3 Memoria RAM

La memoria RAM es la encargada de guardar las variables y el puntero de la pila durante el funcionamiento del sistema. En este dispositivo la memoria RAM es de 512 byte. La dirección inicial es 0x0200 y la final es 0x03FF.

2.8.4 Sistema de Reloj

Este módulo se encarga de la generación y distribución de señales de reloj, tanto para el CPU como para los periféricos internos. El sistema de reloj incluye tanto fuentes como señales. Las fuentes de reloj son circuitos osciladores internos o externos al microcontrolador que generan señales eléctricas de frecuencia fija. Estas fuentes de reloj presentan parámetros configurables mediante software. El dispositivo cuenta con 3 fuentes y 3 señales de reloj.

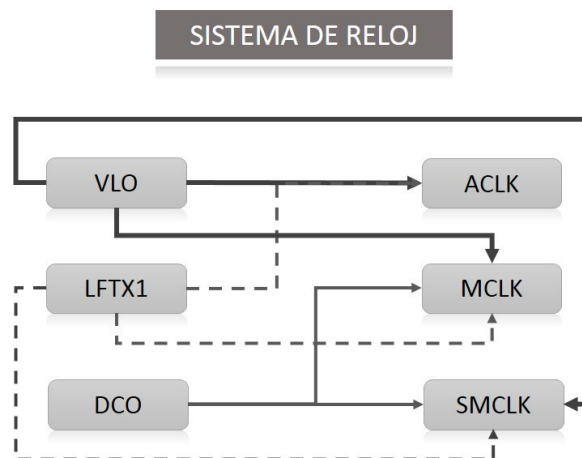


Fig. 2.9. Fuentes y señales de Reloj.

Tabla 2.2. Señales de Reloj del microcontrolador MSP430G2553

Señales	Descripción
MCLK (Master Clock)	Es la señal de reloj usada por la CPU y el sistema; es generada por cualquiera de las fuentes (VLOCLK, DCOCLK y LFXT1CLK). La frecuencia de la señal puede ser dividida entre 1, 2, 4 y 8.
SMCLK (Sub-Main Clock)	La señal es usada para los periféricos. Es generada por cualquiera de las fuentes (DCOCLK, VLOCLK, LFXT1CLK). La frecuencia de la señal puede ser dividida entre 1, 2, 4 y 8.
ACLK (Auxiliary Clock)	La señal es usada por los periféricos. Se obtiene a partir de la fuente VLOCLK o un cristal externo (LFXT1CLK). La frecuencia puede ser dividida entre 1, 2, 4 y 8. Se usa como señal auxiliar para a los periféricos cuando la CPU está dormida.

Tabla 2.3. Fuentes de Reloj del microcontrolador MSP430G2553

Señales	Descripción
LFXT1CLK (Low Frequency Oscillator)	Es un oscilador de baja frecuencia, puede utilizar un oscilador o un cristal externo de 32,768 KHz. Esta fuente se utiliza cuando se necesita mayor precisión y estabilidad, ya que presenta una variación despreciable con respecto al tiempo y a la temperatura.
VLOCLK (Very Low Power, Low Frequency Oscillator)	Es un oscilador de bajo consumo y baja frecuencia. Brinda una frecuencia típica de 12 kHz la cual es fija y no se puede cambiar por software. Se utiliza en aplicaciones de bajo consumo de energía en las cuales no es necesaria la precisión, ya que tiende a cambiar por cuestiones de temperatura y alimentación (0.5 % /°C y 4% /V).
DCOCLK (Digitally Controlled Oscillator)	Es un oscilador digital interno, que genera una señal cuya frecuencia varía con la temperatura y el voltaje. El dispositivo ha sido calibrado de fábrica con 4 frecuencias: 1, 8, 12 y 16 MHz y tiene como desventaja que Texas Instrument realiza sus calibraciones a 30°C y 3V, si el sistema opera lejos de

estos valores, la calibración no será buena. Si se trabaja con señales calibradas se tiene una desviación de frecuencia prefijada de ± 3 ; en cambio con señales no calibradas la desviación es de ± 10 .

2.8.5 Circuito *Brownout Reset* (BOR)

El circuito *Brownout Reset* es un sistema de protección que detecta los niveles bajos de tensión cuando se energiza el dispositivo o cuando se desconecta la fuente de alimentación. Este circuito reinicia el dispositivo mediante el evento POR descrito anteriormente.

2.8.6 Sistema Supervisor de Voltaje (SVS)

Los MSP430 cuentan con un sistema que permite monitorear el voltaje de alimentación del microcontrolador o el voltaje en un pin externo, a la vez detecta cuando ocurre una caída de tensión en los casos antes mencionados. La condición de nivel bajo existe cuando la tensión cae 1,25 menos, un voltaje que se fija como umbral por el usuario.

2.8.6.1 Características del SVS

- Monitoreo de VCC
- Canal externo para el monitoreo de voltaje externo
- 14 voltajes de umbral seleccionables

2.8.7 Modos de operación

El microcontrolador MSP430G2553 puede trabajar en 5 modos de operación. Estos modos de funcionamiento se clasifican en dos grupos, la clasificación basada en el consumo y la respuesta del micro a un evento determinado.

- **Modo activo:** Todos los recursos del microcontrolador se encuentran activos y todas las señales de reloj se encuentran habilitadas. La CPU se encuentra ejecutando instrucciones. Las ventajas de este modo de operación es la rápida respuesta ante un evento. Sin embargo el consumo es mucho más elevado.

- **Modos de bajo consumo:** En este grupo se encuentran 4 modos de operación donde algunas señales de reloj o todas se encuentran desactivadas. La CPU puede estar dormida, sin ejecutar instrucciones. La ventaja de este modo de operación es el bajo consumo, pero como consecuencia el dispositivo presenta una respuesta más lenta ante determinados eventos. Para salir de estos modos de bajo consumo se necesita el uso de una interrupción generada por un periférico externo. Cuando el procesador sale de este modo vuelve al modo activo habilitando todas las señales de reloj.
 - LPM0 (*low power mode 0*): La CPU desactivada, las señales ACLK y SMCLK permanecen activas, mientras que MCLK se encuentra desactivada.
 - LPM1 (*low power mode 1*): La CPU se encuentra desactivada, ACLK y SMCLK permanecen activos y MCLK desactivado. El generador de DC embebido en el DCO está desactivado, siempre y cuando este no se esté usando en modo activo.
 - LPM2 (*low power mode 2*): CPU desactivada, MCLK y SMCLK están desactivadas. El generador de DC del DCO se encuentra activo, mientras que ACLK permanece activa.
 - LPM3 (*low power mode 3*): CPU desactivada, señales MCLK y SMCLK desactivados. Generador DC del DCO desactivado. ACLK permanece activa.
 - LPM4 (*low power mode 4*): CPU desactivada, las señales MCLK, SMCLK y ACLK desactivadas, generador de DC del DCO desactivado. Oscilador de cristal parado.

2.8.8 Interrupciones

Las interrupciones representan un elemento extremadamente importante a la hora de lograr el correcto funcionamiento de un microcontrolador cualquiera. Estas se encargan de realizar determinadas operaciones en respuesta a cualquier evento ocurrido tanto interno como externo. En los MSP430 existen 3 tipos de interrupciones:

- **Restauración de Sistema (RESET):** Este tipo de interrupción es la más crítica de todas ya que no se pueden deshabilitar; está asociada a cualquier condición del reset del microcontrolador. El programador no tiene el más mínimo control sobre ella.

- **Interrupciones no enmascarables (NMI):** Cuando se habla de enmascarar interrupciones se refiere a la posibilidad de no poder deshabilitarlas colectivamente y sí habilitarlas individualmente. En MSP430 estas interrupciones no se pueden enmascarar mediante el bit de habilitación general (GIE) del SR (Registro de Estado). Pero se pueden enmascarar por bits de habilitación individuales como NMIE, ACCVIE, OFIE del registro IE1 (Habilitación de Interrupciones) que se observará posteriormente.
- **Interrupciones enmascarables:** Estas interrupciones se pueden deshabilitar mediante los bits de habilitación individuales de cada interrupción o por el bit de habilitación general GIE. Si se deshabilitan con el bit GIE, se deshabilitan todas las interrupciones enmascarables. De esta forma puede deshabilitarse las interrupciones de manera local a través los bits de habilitación individuales o de manera global a través el bit GIE en el SR.

Evento RESET: El RESET es un evento especial que lleva asociado una interrupción no enmascarable como se dijo anteriormente, este permite sacar a la CPU de cualquier situación en la que se encuentre, permite además definir un estado inicial para el sistema. En la familia MSP430 se encuentran dos señales RESET:

- **POR (*Power On Reset*):** Ocurre cuando se enciende el dispositivo o cuando hay problemas en la alimentación. Está relacionada con el hardware del dispositivo.
- **PUC (*Power Up Clear*):** Ocurre cuando expira el tiempo del perro guardián (*watchdog*) o cuando ocurre una violación al acceso de la memoria flash. Este tipo de interrupción está relacionada con el software.

Cuando se inicializa el sistema, el contador de programa carga la dirección de memoria almacenada para el RESET. Tras el evento, el código grabado en el dispositivo debe encargarse de inicializar la pila, configurar el perro guardián (*watchdog*) de forma adecuada y configurar los periféricos que se vayan a utilizar.

2.8.8.1 Vector de Interrupciones

El vector de interrupciones es un arreglo ubicado al final de la memoria de programa (0xFFE0-0xFFFF). Su función es almacenar las direcciones de memoria de la Rutina de Atención a Interrupciones (RTI) para una determinada interrupción. Cuando sucede una

interrupción, la CPU se auxilia de este vector para saber dónde se halla la RTI asociada a la interrupción que se produjo. Cada uno de los periféricos tiene asociada una posición en el vector de interrupciones.

2.8.9 Puertos de entrada/salida de propósito general

Los puertos de entrada/salida permiten introducir valores digitales y analógicos al microcontrolador a través de sus pines. Configurándolos como entrada permiten comprobar el valor de señales generadas por dispositivos externos como pulsadores, teclados, sensores analógicos y digitales. Si se configuran como salida permiten generar señales digitales para controlar dispositivos externos como Led, displays LCD, entre otros. El MSP430G2553 dispone de dos puertos de entrada/salida. Estos puertos constan de 8 pines cada uno que se representan como un conjunto de registros. Modificando los valores de estos registros se pueden configurar los puertos para que realicen funciones. Las principales características de estos puertos son:

- Configuración individual de registros de entrada y salida.
- Configuración individual de interrupciones entre los dos puertos.
- Configuración individual de resistencias pull-up y pull-down en cada entrada/salida.

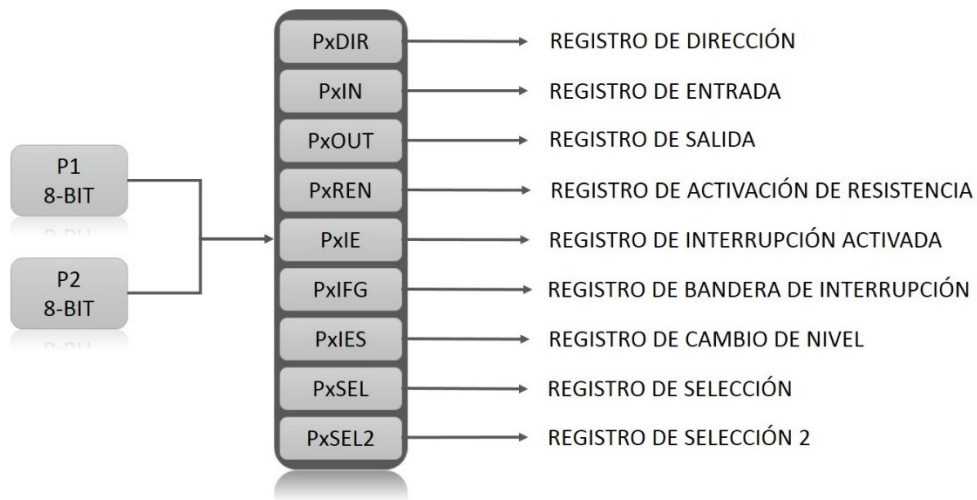


Fig. 2.10. Registros de los puertos de entrada /salida.

Registros P1DIR P2DIR: Este registro permite configurar los pines de ambos puertos como entrada o como salida.

Registros P1IN y P2IN: Permiten determinar el valor de algún pin en caso de que este se encuentre configurado como entrada. Estos registros son de lectura, o sea, que cualquier escritura es ignorada, provocando así un aumento del consumo de corriente.

Registros P1OUT y P2OUT: Permite determinar el valor de algún pin en caso de que este esté configurado como salida.

Registros P1REN Y P2REN: Como ya se conoce cada pin de ambos puertos dispone de resistencias *pull-up* y *pull-down*. Este registro se encarga de activar las resistencias que por defecto se encuentra desactivadas. Cabe recordar que la resistencia *pull-up* está conectada a VCC para poner un nivel alto en la salida cuando el transistor que hay conectado en el pin no conduce; permiten a su vez poner un nivel bajo a la salida cuando el transistor conduce. La resistencia de *pull-down* realiza una función similar aunque esta se conecta a tierra.

Registros P1SEL, P1SEL2, P2SEL y P2SEL2: Cada pin de los puertos entrada/salida posee la capacidad de producir oscilaciones, la frecuencia de oscilación depende de la capacidad de carga del pin. Estos registros son los encargados de habilitar la opción de oscilación. Una vez seleccionada esta función se deshabilitan automáticamente el resto de funcionalidades de dicho pin.

Registros P1IE, P1IFG, P2IE y 2IFG: Cada pin de entrada/salida de los puertos P1 y P2 pueden generar interrupciones. Estas interrupciones se generan cuando el dispositivo detecta un cambio en el nivel de la señal digital conectada a un pin determinado. Los pines de un mismo puerto generan la misma interrupción o sea que en este caso dicha interrupción tiene 8 fuentes. Los registros P1IE y P2IE son los encargados de habilitar o deshabilitar esta operación.

Registros P1IFG y P2IFG: Cuando se genera una interrupción en cualquiera de los puertos, se activa una bandera asociada a esa interrupción. En estos registros se encuentra el estado de estas banderas que corresponde a pin de entrada/salida. Inicialmente las banderas se encuentra en nivel bajo.

Registros P1IES y P2IES: Estos registros establecen si el cambio de nivel en los pines de entrada/salida es de flanco de subida o bajada. Inicialmente en el dispositivo se encuentran en flanco de subida.

2.8.10 Conversor Analógico – Digital

Para la conversión de señales analógicas a digitales cuenta con el módulo ADC10, es un conversor A/D tipo SAR, el cual posee una resolución de 10 bits. Para la configuración

posee 3 registros ADC10CTL0 (Registro de Control 0), ADC10CTL1 (Registro de Control 1), ADC10AE0 (Registro de Control de entradas analógicas). Los valores digitales de la conversión se guardan en el registro ADC10MEM de 16 bit.

2.8.10.1 Características principales

- Tiempo de retención de muestra programable.
- Voltajes de referencia interna de 1.5 v y 2.5 v y externa de VCC a GND.
- 8 canales para la conversión.
- Conversión de un solo canal, repetitiva y secuencial.
- Señal de reloj para la conversión programable.
- Oscilador interno de 5000 KHz.
- Transferencia de datos automáticamente finalizada la conversión.
- Sensor de VCC y de temperatura incorporado.

2.8.10.2 Esquema en bloques

En las siguientes figuras se muestra el esquema en bloques del conversor y los registros que intervienen en la configuración del mismo.

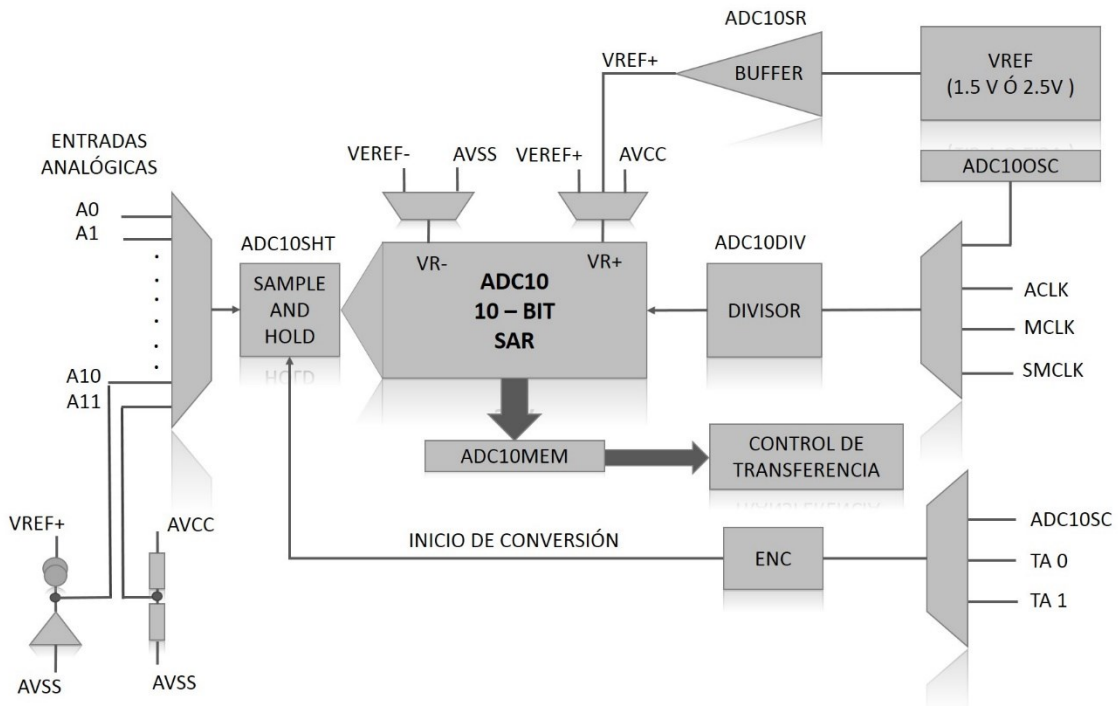


Fig. 2.11. Esquema en bloques del conversor ADC10.

2.8.11 Módulos de comunicación

El MSP430G2553 incluye 2 módulos para la transmisión de datos llamados USCI_A0 y USCI_B0. Cada uno soporta diferentes estándares de comunicación, a continuación se describen estos módulos.

Módulo USCI_A0

- Modo UART.
- Comunicación IrDA.
- Estándar SPI.

Módulo USCI_B0

- I²C.
- SPI.

En este trabajo solo se abordará el modo de comunicación UART debido a que es el modo utilizado en el desarrollo de la aplicación.

2.8.11.1 Comunicación UART

El modo UART recibe y transmite datos por los puertos P1.1 y P1.2 respectivamente. La tasa de transmisión o *baud-rate* puede ser de 1.200 kbps a 460.800 kbps.

2.8.11.2 Características del módulo UART

- 7 o 8 bit de datos con bit de paridad o sin bit de paridad.
- Registros independientes para la recepción y la transmisión.
- Buffers separados para la recepción y la transmisión.
- Velocidad de transmisión programable.
- Interrupción independiente para la recepción y la transmisión.
- Banderas para la detención de errores.
- Banderas para la detección de direcciones.

2.8.11.3 Esquema en bloques del módulo USCI con UART activado

El bloque USCI_A0 puede trabajar con las señales UCLK, ACLK y SMCLK, la señal de reloj seleccionada va hacia al bloque divisor/modulador, este entrega las señales de reloj a los bloques de transmisión y recepción. Estos dos últimos bloques cuentan con buffers y registros para realizar las operaciones para la cual están confinados. Para ver el formato de la trama (ver anexo 2).

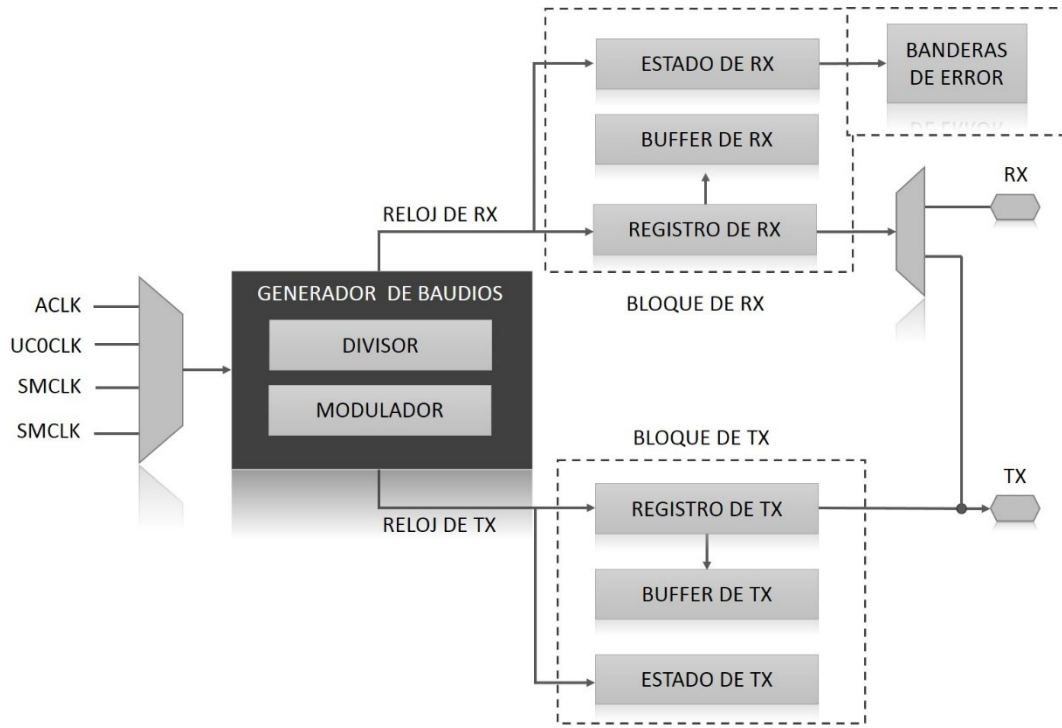


Fig. 2.12. Esquema en bloques del modo UART.

CAPITULO 3 . DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA

En este capítulo se plantean las consideraciones a tener en cuenta para realizar el diseño desde el punto de vista de la finalidad y la objetividad de la aplicación; se describe además el proceso de diseño del software (firmware) y el hardware, la configuración interna del microcontrolador y la valoración económica del proyecto entre otros aspectos.

3.1 Consideraciones del diseño

Los principales aspectos a tener en cuenta son:

- El sistema debe estar a una distancia prudente de la celda ya que este contiene elementos que pueden impedir su correcto funcionamiento.
- El sistema debe brindar una sencilla y efectiva visualización de los parámetros que se manejan, debe contar con una interfaz acogedora para el operador, además de incluirse un manual de operación.
- La temperatura como variable más importante a medir debe ser controlada en un rango de 35°C a 30°C para evitar que la reacción química en el interior de la celda sea reversible, es decir, que los productos se conviertan en agentes y se forme un ciclo no deseado.
- Debe considerarse la distancia del sensor al sistema para evitar perturbaciones y atenuación en la señal que este entrega. Por otra parte la elección del sensor es muy importante, como la máxima temperatura que el sistema va a procesar es alrededor de los 35°C no hay inconveniente en elegir un sensor semiconductor; los cuales generalmente brindan una respuesta lineal y los hace una opción ideal para el diseño.

3.2 Propuesta del sistema

El dispositivo debe supervisar y controlar la temperatura de la reacción química que tiene lugar en la celda electrolítica; como se describió en el Capítulo 1 en caso de que dicha reacción se acerque a los 35° C los electrodos de la celda deben ser desconectados de la fuente de alimentación y conectados nuevamente cuando la temperatura baje hasta los

30° C; el dispositivo también debe guardar los intervalos de tiempo en que están alimentados los electrodos y la suma total del tiempo en que está energizada la celda.

Para cumplir con todas esas tareas el sistema debe tomar muestras de temperatura, compararlas internamente y realizar un ciclo de histéresis para garantizar el control. Una vez realizadas estas operaciones el sistema debe visualizar los valores de temperaturas capturados así como el tiempo transcurrido en el todo del proceso. De igual forma se puede conectar el dispositivo a un ordenador e ir enviando los datos para que de forma remota el operador pueda controlar y estudiar el proceso así como tomar determinadas decisiones en cuanto a este.

Para la medición de temperatura se emplea el sensor integrado LM35 y un filtro pasa bajo para evitar perturbaciones en la señal que entrega el sensor. La visualización de los parámetros se materializa con el display LCD LM016L el cual brinda un bus de datos de 8 bit y 3 señales para el control. En la etapa de salida se tiene un optoacoplador para aislar eléctricamente el microcontrolador del circuito de fuerza (actuador), así se toman precauciones para evitar que cualquier accidente dañe el funcionamiento del núcleo del sistema.

Para interactuar con el dispositivo se utilizan tres botones que cumplen las funciones de configuración, interacción con el cronómetro e inicio/parada del proceso. El botón A se emplea para entrar en el modo de configuración; en este modo se seleccionan los valores predefinidos de corriente eléctrica y carga total que se encuentran grabados en la memoria del microcontrolador. El botón B se encarga del inicio y parada del cronómetro, que a la vez controla el encendido y apagado de la fuente de alimentación. La función del botón C es resetear el cronómetro.

Para la transmisión de datos se utiliza el módulo interno del dispositivo encargado de dicha función, más el circuito integrado MAX232 el cual se encarga de adaptar las tensiones TTL a los niveles adecuados para la transmisión serie RS-232.

Como último elemento se tiene el control de tiempo; este se realiza con los temporizadores internos del dispositivo y la ayuda de un cristal externo de 32,768 KHz para garantizar la precisión.

3.3 Diseño eléctrico del sistema

En este epígrafe se muestra el esquema eléctrico del sistema, los componentes que intervienen en el diseño y sus aspectos más importantes.

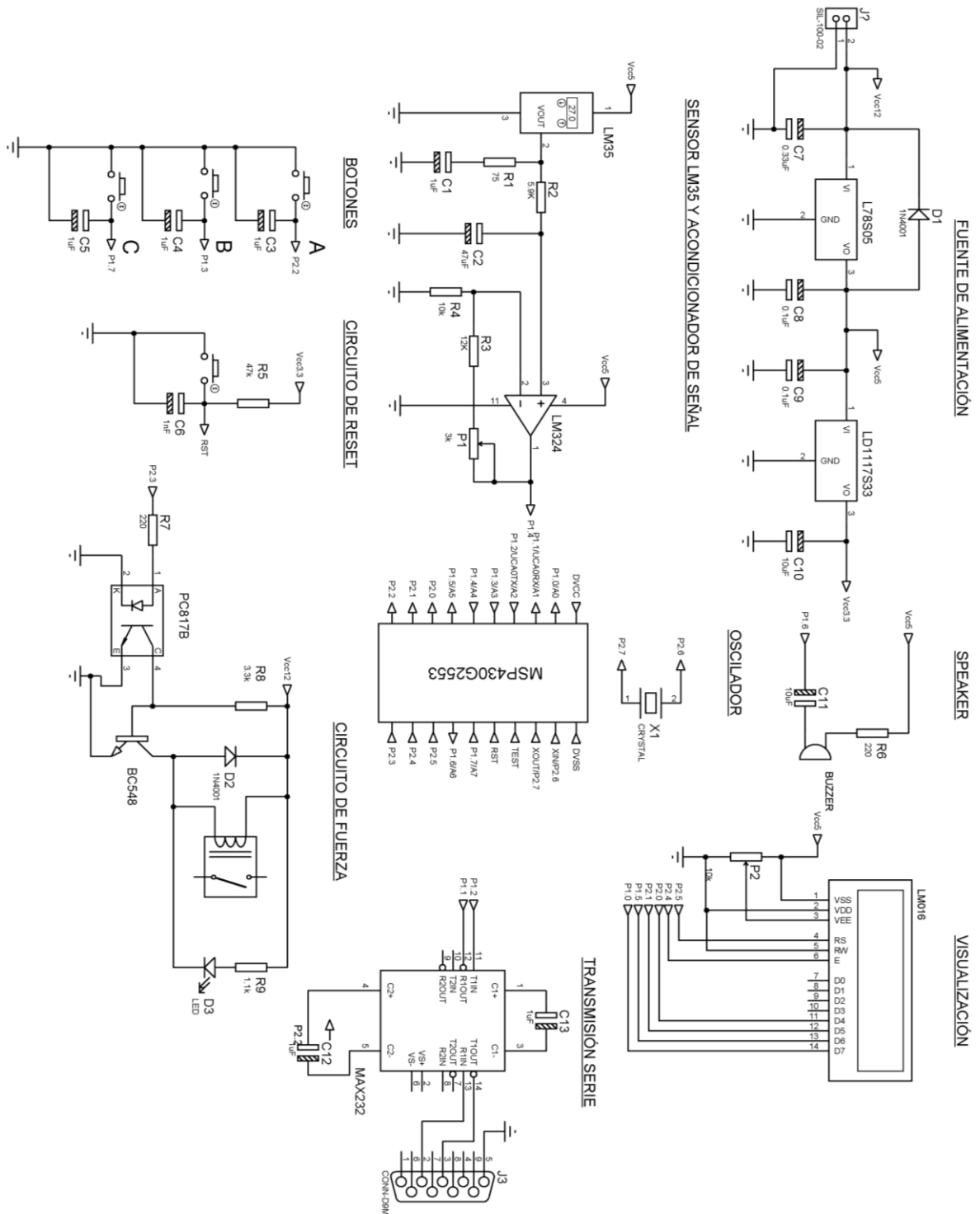


Fig. 3.2. Esquema eléctrico del sistema.

3.3.1 Etapa de adquisición de datos

En esta etapa se encuentra la parte del hardware encargado de la adquisición de señales entregadas por el sensor. Consta de cuatro elementos básicos: sensor encargado de convertir el fenómeno físico (temperatura en este caso) a una magnitud eléctrica, bloque acondicionador para filtrar y amplificar la señal, desacoplamiento para minimizar las fuentes de interferencias en complemento con un cable apantallado desde el sensor al sistema.

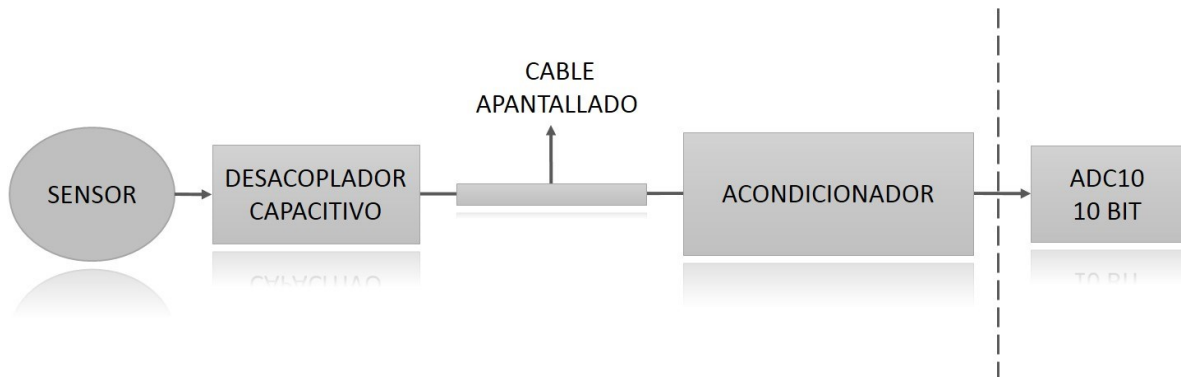


Fig. 3.3. Esquema en bloques de la etapa de adquisición de datos.

3.3.1.1 Sensor LM35

El LM35 es un sensor de precisión integrado para la medición de temperatura, cuya salida entrega un voltaje linealmente proporcional a la temperatura en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$), el LM35 no necesita calibración externa ni ajustes de precisión. Debido a las características antes mencionadas y su baja impedancia permite gran facilidad a la hora de diseñar una determinada aplicación. Puede trabajar con fuente simple o doble. A continuación se muestran sus principales características:

- Alimentación: 4volt a 30 volt
- Baja impedancia de salida: 0.1Ω para 1 mA de carga
- Bajo calentamiento interno: $0.08 \text{ }^{\circ}\text{C}$ en aire libre
- Calibrado en grados Celsius
- Factor de escala: $+ 10.0 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$
- Precisión garantizada de $0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $+ 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Rango de temperatura evaluado: $- 55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Error acumulado en su rango completo: $\pm \frac{3}{4} \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Precisión: $\pm \frac{1}{4} \text{ }^{\circ}\text{C}$

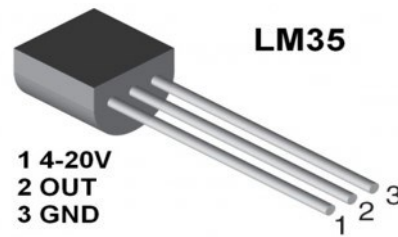


Fig. 3.4. Sensor LM35.

El sensor se puede configurar de dos formas, la primera y más sencilla permite un rango de medición de 2 °C a 150 °C; la segunda permite un rango de - 55 °C a 150°C pero necesita de una fuente simétrica y un resistor a la salida del sensor. Para evitar el inconveniente de utilizar alimentación simétrica el fabricante propone una alternativa que consiste en crear una tierra virtual; o sea que el pin negativo del sensor LM35 no irá directamente conectado a la tierra del sistema, ahora este tomará la referencia negativa a través de dos diodos conectados en serie. De este modo se puede trabajar con fuente de alimentación simple y obtener un rango de temperatura por debajo de los 0°C; como inconveniente, esta configuración emplea una señal adicional que es usada para eliminar la caída de tensión que se produce en los diodos. En nuestro diseño se emplea la primera configuración ya que la temperatura mínima que se puede llegar a medir es de 5 °C aproximadamente.

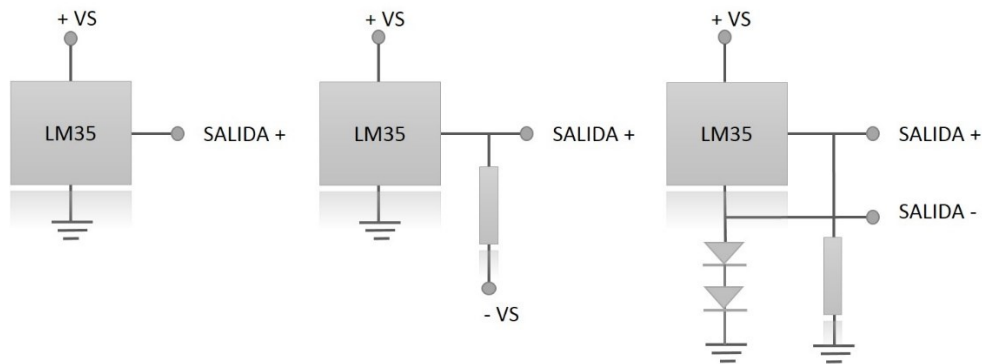


Fig. 3.5. Configuraciones del LM35.

3.3.1.2 Interferencia en la señal

En todo sistema electrónico existen señales que rigen el correcto funcionamiento del mismo, más si son señales resultantes de algún tipo de medición. Los errores cometidos

a la hora del diseño son la principal causa de los cambios que presentan estas señales influenciados por interferencias y otras perturbaciones electromagnéticas. Por tal motivo es de vital importancia la protección que deben presentar los sistemas diseñados para eliminar dichos efectos.

Existen varias fuentes de interferencia electromagnéticas como son:

- Transformadores
- Cableado de red eléctrica
- Motores
- Bobinas
- Relés
- Fuentes conmutadas
- Sistemas de transmisión de radiofrecuencia
- Descargas atmosféricas

Todas las fuentes antes mencionadas dan lugar a la aparición de tensiones y corrientes indeseadas, produciendo así una disminución de la relación señal – ruido del sistema, esta disminución se hace más grande cuando la señal que genera la interferencia sea mayor que la señal afectada.

3.3.1.3 Desacoplamiento capacitivo del sensor

En el diseño del sistema, el sensor de temperatura LM35 va a estar separado del microcontrolador a una distancia máxima de 4 metros, debido a esta distancia y las fuentes antes mencionadas es necesario tomar medidas para evitar perturbaciones en la señal que debe entregar dicho sensor.

Teniendo en cuenta lo antes planteado, del sensor al dispositivo deben salir 3 conductores: voltaje de alimentación del sensor, señal entregada por el sensor y la tierra. Estos conductores además de estar a merced de las perturbaciones generan capacidades parásitas entre sí, para minimizar estos obstáculos se emplea un capacitor de desacoplamiento entre la alimentación del sensor y la tierra, un amortiguador R-C a la salida del sensor acompañado de un cable apantallado desde el mismo al dispositivo.

El cable apantallado utilizado como hilo conductor de la salida del sensor reduce el efecto de las capacidades que se crean entre dicho terminal y los conductores a su alrededor. El cable consiste en un conductor interno y una malla de apantallamiento conectada a tierra,

de esta forma cuando se genera alguna capacidad indeseada va hacia la malla de apantallamiento que está conectada a la tierra y por tanto protege al conductor interno de tensiones inducidas.

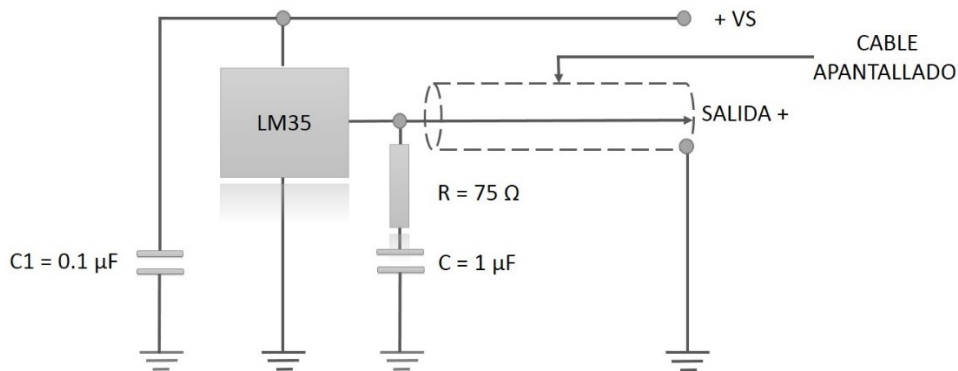


Fig. 3.6. Esquema del desacoplamiento capacitivo.

3.3.1.4 Acondicionador de nivel

El acondicionador de nivel como indica su nombre prepara la señal que se va a procesar antes de entrar al conversor analógico – digital embebido en el microcontrolador. Para el acondicionamiento de la señal entregada por el sensor LM35 se emplea un amplificador no inversor; este se encarga de amplificar los bajos niveles de tensión que entrega dicho sensor.

Dicho amplificador está basado en el AO LM324, como ya se conoce la aparición de estos tipos de amplificadores han sustituido el tradicional número de componentes que anteriormente complejizaban el diseño y afectaban la precisión a la hora de realizar cualquier operación, en este caso la medición de una señal analógica.

El LM35 entrega $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ y ADC del microcontrolador es de 10 – bit, o sea que ofrece $2^{10} = 1024$ niveles de cuantificación, además se emplea una referencia interna de 2,5 volt, todos estos parámetros se utilizan para calcular la ganancia óptima del amplificador.

Primero se calcula el factor de conversión:

$$\left(10 \frac{\text{mV}}{^{\circ}\text{C}} \times 1024 \text{muestras}\right) / 2.5 = 4.096 \text{muestras}/^{\circ}\text{C} \quad (3.1)$$

La temperatura máxima a medir por el sistema puede llegar rara vez a 60°C , pero se tomara como temperatura umbral a 100°C , esto para no restringir el rango de medición

del sistema. Entonces si la temperatura varía de 0 a 100 °C el convertidor registra de 0 a 409 muestras, si ese es el rango de medición se está utilizando aproximadamente 9 bit del convertidor, ya que $2^n = 409$ donde $\log_2 409 = 8,675$. Para aprovechar el rango completo del ADC se debe amplificar la señal del sensor por la relación de 1024/409, que es igual a 2,503. Entonces quedaría:

$$\left(10 \frac{mV}{^{\circ}C} \times 2.5 \times 1024 \text{muestras} \right) / 2.5 = 10.24 \text{muestras}/^{\circ}C \quad (3.2)$$

Para fijar la ganancia del amplificador no inversor se tiene la ecuación:

$$G = \frac{R_2}{R_1} + 1 = 2.5 \quad (3.3)$$

Fijando R_1 igual a 10 k Ω se tiene que R_2 va hacer igual a 15 k Ω , para ajustar el offset del amplificador operacional se inyecta una pequeña tensión al terminal negativo mediante un resistor igual al paralelo entre R_1 y R_2 , el cual es aproximadamente igual a 6 k Ω . Hay que tener en cuenta las tolerancias de las resistencias empleadas para determinar la ganancia real del amplificador, el potenciómetro P_1 ajusta dicha ganancia.

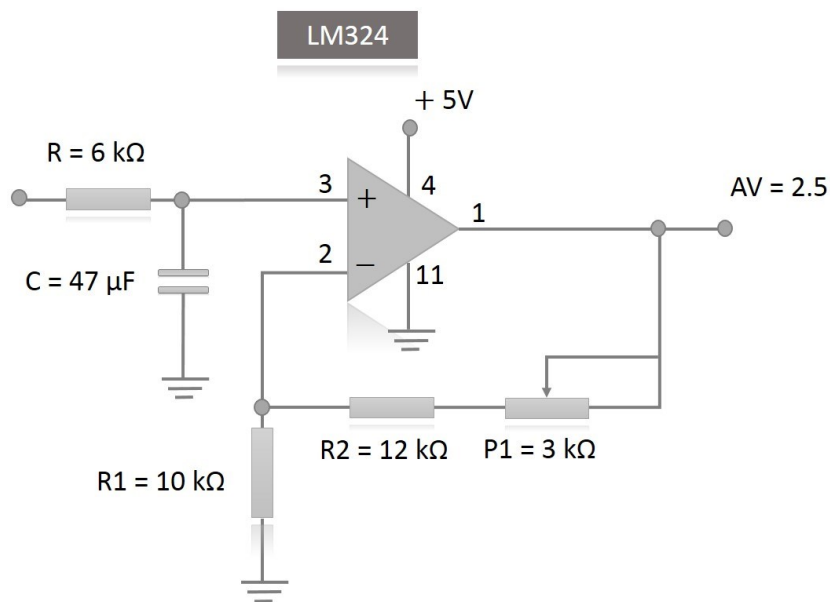


Fig. 3.7. Esquema del acondicionador de nivel.

En serie con la resistencia de ajuste de offset se encuentra un capacitor de 47 μF formando un filtro pasa bajo con una frecuencia de corte aproximadamente igual 0.57 Hz para evitar posibles variaciones en la señal de entrada.

3.3.2 Errores en la medición

La precisión del sistema es un elemento de primer orden, en este epígrafe se calculan los errores en la medición.

3.3.2.1 Error del sensor LM35

El error del sensor está determinado por la ecuación (3.4), para realizar los cálculos se tomó en cuenta el peor de los casos.

$$error = e_{nolineal} + e_{estáticos} + e_{variables} \quad (3.4)$$

Error de linealidad: Se calcula para una desviación típica de $\pm 0.2^\circ\text{C}$ según el fabricante. Se toma como referencia 1000 mV, ya que equivale a 100°C siendo esta la máxima temperatura que puede medir el sistema.

$$e_{nolineal} = \frac{\pm 0.2^\circ\text{C} \times 10\text{mV}/^\circ\text{C}}{1000\text{mV}} \times 100 = \pm 0.2\% \quad (3.5)$$

Errores estáticos: Se tomó en cuenta el error de ganancia, donde el offset equivale a ΔS .

$$\Delta S = \pm 0.6\text{mV}/^\circ\text{C}$$

$$E_{ganancia} = \Delta S \times \Delta T = (\pm 0.6\text{mV}/^\circ\text{C}) \times 100^\circ\text{C} = \pm 60\text{mV} \quad (3.6)$$

$$e_{estáticos} = e_{ganancia} = \frac{E_{ganancia}}{\Delta V_{sensor}} \times 100 = \frac{\pm 60\text{mV}}{1000\text{mV}} \times 100 = \pm 6\% \quad (3.7)$$

Errores variables: El error de autocalentamiento según el fabricante es de $\pm 0.08^\circ\text{C}$.

$$e_{calentamiento} = \frac{\pm 0.08\% \times 10 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}}{1000 \text{ mV}} \times 100 = 0.08\% \quad (3.8)$$

Entonces el error incorporado por el sensor según (3.4) es:

$$error = 0.2\% + 6\% + 0.08\% = \pm 6.28\%$$

El error más probable se determina por la ecuación (3.9).

$$e_{mp} = \sqrt{\sum errores_i^2} = \sqrt{0.2^2 + 6^2 + 0.08^2} = \pm 6.003\% \quad (3.9)$$

3.3.2.2 Error de cuantificación del módulo ADC10

El error de cuantificación está definido por la ecuación (3.10), este depende a la vez del nivel de cuantificación del conversor AD [12]:

$$e_{cuantificacion} = \pm \frac{Q}{2} \quad (3.10)$$

El nivel de cuantificación se calcula mediante la ecuación (3.11) donde 2.5 representa el intervalo a escala completa.

$$Q = \frac{V_{ref}}{2^n} = \frac{2.5}{1024} = 2.441 \text{ mV} \quad (3.11)$$

Entonces de (3.10):

$$e_{cuantificacion} = \pm 1.22 \text{ mV}$$

$$e_{cuantificacion[\%]} = \frac{\pm 1.22mV}{1024} \times 100 = \pm 0.001\% \quad (3.12)$$

Se procede a calcular la varianza del error de cuantificación, esta no es más que la variación de dicho error con respecto a su medida. Como el promedio de la señal de entrada es menor que el nivel de cuantificación, la varianza del ruido de cuantificación se obtiene por la ecuación (3.13) [12].

$$\sigma^2 = \frac{Q^2}{12} = 0.0124\mu V \quad (3.13)$$

3.3.2.3 Error total

El error total de la medición en el peor de los casos equivale a la ecuación (3.14):

$$e_t = e_{sensor} + e_{ADC} \quad (3.14)$$

$$e_t = 6.0\% + 0.001\% = \pm 6\%$$

3.3.3 Visualización

Para la visualización de los parámetros: temperatura y tiempo; se utilizó una pantalla de cristal líquido LCD, se podría haber trabajado con displays 7 segmentos, pero esto aumentaría la cantidad de componentes y el costo del diseño.

Existen 2 tipos de LCD: alfanuméricos y gráficos. Los primeros representan números y letras mediante una matriz de puntos, mientras que los segundos se controlan mediante matrices de píxeles que pueden ser apagados o encendidos individualmente. La cantidad de caracteres en caso de los displays alfanuméricos está determinado por el número líneas y el número de caracteres en cada línea; existen LCD de 16x2, 2x32, 2x40, 4x16 y 4x20. En caso de los gráficos pueden ser matrices de 122x32, 128x64, 240x64, 240x128 y 160x128.

Los LCD alfanuméricos permiten graficar los caracteres del código ASCII, representan letras mayúsculas, minúsculas, signos de puntuación, números y otros símbolos. También admiten graficar caracteres definidos por el usuario. Disponen de dos de memorias para guardar los datos: DD RAM (*Display Data RAM*) y CG RAM (*Character Generator RAM*).

En la memoria DD RAM se almacenan los caracteres que están siendo visualizados, mientras que en la memoria CG RAM se encuentran los caracteres definidos por usuario.

3.3.3.1 Display LCD LM016L

Se seleccionó para formar parte del diseño el LCD LM016L, el cual es uno de los displays alfanuméricos más usados en el mundo de la electrónica, no presenta luz trasera (*backlight*), su pantalla es color gris y los píxeles monocromáticos. Posee 2 líneas de 16 caracteres, cada caracter es generado por una matriz de 5 por 7 puntos, cuenta con el controlador Hitachi HD44780 y para la conexión posee 14 pines: 3 para el funcionamiento, 3 para bus de control y 8 para el bus datos.

El bus de control cuenta con 3 terminales RS (Selección de Registro), R/W (Lectura / Escritura) y E (Habilitación del LCD). La señal RS permite seleccionar si los byte transferidos son instrucciones o datos. La señal R/W como su nombre lo indica se encarga especificar si se va a escribir en la pantalla o se va a leer. La señal E habilita o deshabilita cualquier operación el LCD.

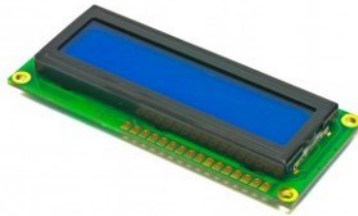


Fig. 3.8. LCD LM016L.

El controlador HD44780 permite utilizar un bus de datos de 8 líneas o un bus de datos multiplexado de 4 líneas, donde las líneas en este caso son las 4 más significativas del bus, esta última configuración es la utilizada en el diseño para preservar el número de terminales del microcontrolador.

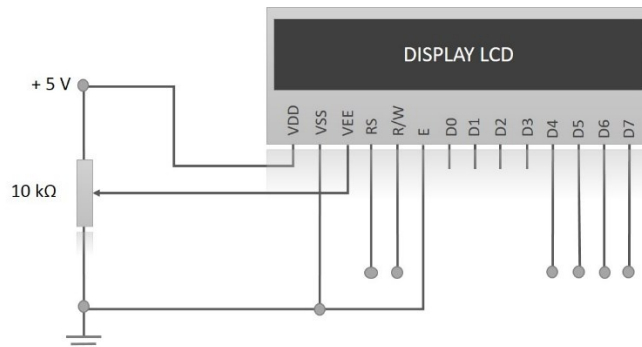


Fig. 3.9. Configuración del display LM016L.

Los terminales restantes son VDD, VSS y VEE, donde los dos primeros son para la tierra y la tensión positiva respectivamente, mientras que el tercero se encarga de ajustar el contraste de la pantalla.

A continuación se muestran los parámetros más importantes del display:

Tabla 3.1. Características del LCD LM016L

Parámetros	Valores
Caracteres	16x2 líneas
Controladores	HD44780 & HD44100
Matriz de puntos	5x7
Voltaje de alimentación	5 V
Corriente de alimentación	1 mA
Temperatura de trabajo	0 a 50 °C
Voltaje mínimo de nivel alto	2,2 V
Voltaje máximo de nivel bajo	0,6 V

3.3.4 Botones

Se emplean dos botones que cumplen múltiples funciones. Estos botones van conectados a los pines del microcontrolador en paralelo a un capacitor cada uno; el otro extremo va hacia la tierra del circuito. Debido a que el microcontrolador posee una resistencia interna *pull-up* de 35 kΩ en terminal de entrada/salida, no es necesario el empleo de una resistencia externa.

Cuando se presiona un botón este cortocircuita a tierra el terminal al que está conectado, entonces se genera un nivel bajo en dicho terminal, en caso de no presionarse ningún botón el terminal siempre se encuentra en nivel alto. Los cambios de nivel alto a nivel bajo generan interrupciones, de esta forma el dispositivo detecta cuando un terminal de entrada/salida se encuentra en nivel bajo o sea se ha presionado un botón.

Un problema importante a solucionar es el efecto rebote de los botones debido a sus estructuras mecánicas. El efecto rebote se traduce a las variaciones internas que ocurren entre los contactos de metal cuando se presiona un botón, estas oscilaciones se detienen cuando finalmente los contactos se acomodan debido a la presión. Para evitar este efecto se emplean demoras que se pueden materializar de forma física o por programación del dispositivo. En el diseño se empleó el uso de un capacitor, el cual está conectado al mismo

terminal del botón formando un circuito RC junto a la resistencia de *pull-up* correspondiente. Normalmente el capacitor se encuentra cargado en nivel alto a través de la resistencia, una vez presionado el botón (cortocircuita el terminal a tierra) el capacitor se resiste al cambio de voltaje y se descarga a tierra en un tiempo definido por la constante RC, así se crea la demora y se reduce el efecto rebote. Cabe destacar que estas transiciones pueden generar niveles inesperados, es por ello que es necesario el uso de un *Schmitt Trigger*, lo cual no es un problema para el diseño ya que el MSP430G2553 incluye *Schmitt Trigger* en sus terminales de entrada/salida.

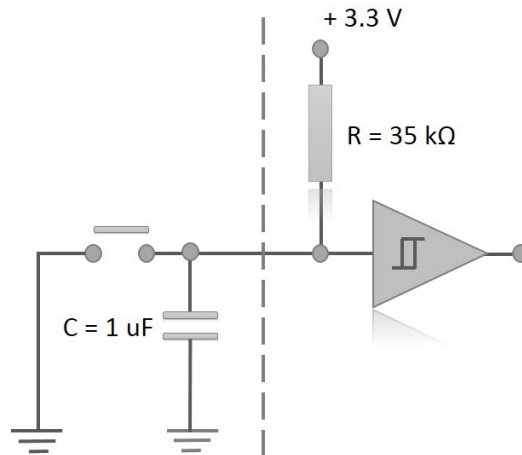


Fig. 3.10. Esquema de conexión de botones.

3.3.5 Transmisión y recepción de datos

Como se había planteado anteriormente es necesario comunicar el sistema con un ordenador para permitir el control de forma remota; para ello se emplea el módulo UART del microcontrolador. Se escogió una velocidad de transmisión/recepción de 19200 baudios (19200 símbolos por segundo), la cual está recogida en el estándar de comunicaciones RS-232 y alcanza distancias de 15 m aproximadamente, esta distancia es más que suficiente para el propósito del proyecto; más adelante se describen detalladamente algunos elementos fundamentales de la norma RS-232.

El módulo UART se configuró con la señal de reloj que rige la CPU del dispositivo, que es de 8 MHz. Para lograr el correcto funcionamiento de este módulo se necesita la configuración de registros que determinan la velocidad de transmisión/recepción. Los registros son UCABR0 y UCABR1, aquí se guarda el valor de la división entre la señal de reloj y la velocidad en baudios; ambos son de 8 – bit o sea si la división es mayor que 255

en el primer registro se guarda la parte baja y en el segundo la parte alta. De esta forma se tiene que:

$$UCABRx = \text{Número_Entero} \left(\frac{\text{Señal_Relej}}{\text{Velc.TX_RX}} \right) \quad (3.15)$$

$$UCABRx = \text{Número_Entero} \left(\frac{8000000}{19200} \right) = 416$$

$$UCABRx_{binario} = 00000001|10100000$$

$$UCABR0 = 160$$

$$UCABR1 = 1$$

3.3.5.1 Trama empleada para la transmisión

La trama diseñada para la transmisión en serie, cuenta con 11 bytes. Los bytes del 0 al 6 representan la información de temperatura, cronómetro, carga e intensidad de corriente. Como la temperatura se guarda en un registro de 16 bit, este valor se divide en dos partes de 1 byte cada una y se transmiten, es tarea del ordenador reconstruir el dato.

El byte 7 representa la información de estado de los electrodos, si estos están conectados o no. En el byte 8 se envía la suma de verificación de los bytes anteriores con el propósito de detectar algún error en la transmisión. El byte 9 brinda información acerca del estado del dispositivo, si este se encuentra en modo configuración o no. Por último se envía un byte que indica el fin de trama.

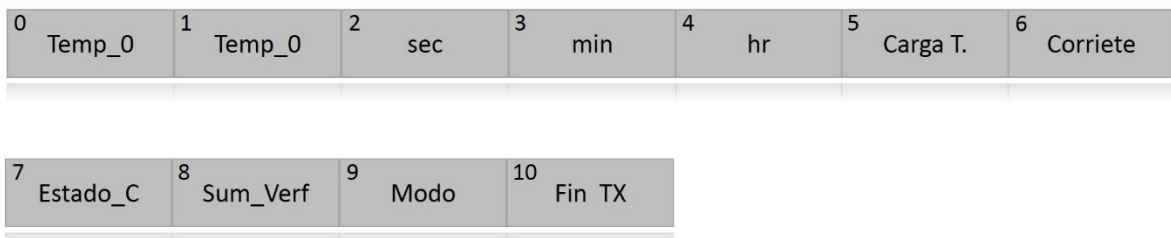


Fig. 3.11. Estructura de trama para la transmisión serie

3.3.5.2 Cálculo de error en la transmisión y recepción

Para calcular los errores de la transmisión se calcula el error de cada bit ya sea en la transmisión o en la recepción y se suman al final, la fórmula para ello está relacionada con la velocidad de transmisión, la señal de reloj que emplea el módulo USCI_A0, el factor de división alojado en los registros UCABR0 y UCABR1 además del valor del registro de 8-bit UCA0MCTL que se encarga de la modulación individual de cada bit a transmitir. A continuación se muestran las fórmulas para calcular el error en la transmisión y en la recepción.

$$e_{TX} [\%] = \left\{ \frac{vel.TX}{clock} \times \left[(j+1) \times fact.div \times \sum_{i=0}^j m_i \right] - (j+1) \right\} \times 100\% \quad (3.16)$$

$$e_{RX} [\%] = \left\{ \frac{vel.TX}{clock} \times \left(2 \times \left[m_0 + \left(\frac{fact.div}{2} \right) \right] + \left[i \times fact.div + \sum_{i=1}^j m_i \right] \right) - (j+1) \right\} \times 100\% \quad (3.17)$$

Donde: j = es la posición del bit a transmitir

m = valor del bit de modulación correspondiente en el registro UCA0MCTL

El registro UCA0MCTL en este caso se configuró con un valor de 0x0C el cual según el fabricante es idóneo para trabajar con velocidades de 19200 baudios y frecuencias de 8 MHz. Teniendo en cuenta esto y las fórmulas anteriores, el error en la transmisión es de un 0.2 % y el de recepción de un 0.4 %.

3.3.6 Estándar RS – 232

El RS – 232 es un estándar de comunicación en serie muy utilizado aprobado por la EIA (*Electronic Industries Association*) tanto para la comunicación síncrona como asíncrona. Este estándar establece una interfaz física y un protocolo de bajas velocidades para la comunicación entre ordenadores y dispositivos. RS–232 admite comunicaciones hasta 15 metros y 20 kbps, se pueden utilizar distancias y velocidades mayores, pero esto no se define en el estándar.

3.3.6.1 Conector DB – 9

El estándar utiliza dos puertos para la conexión en su capa física, el DB–25 y el DB–9, el número al final hace alusión a la cantidad de pines que presenta cada conector. Para la comunicación asincrónica en el proyecto se usa el conector DB-9 ya que es el más utilizado, de esta forma también se reduce el área requerida para el diseño del circuito impreso.

Como la norma fue diseñada para dos tipos de equipos el DTE (Equipo Terminal de Datos) y DCE (Equipo de Comunicación de Datos) existen dos tipos de interfaz: DB-9 macho y DB-9 hembra. Donde el macho se encuentra en el ordenador y la hembra sale en nuestro caso del sistema de control diseñado.

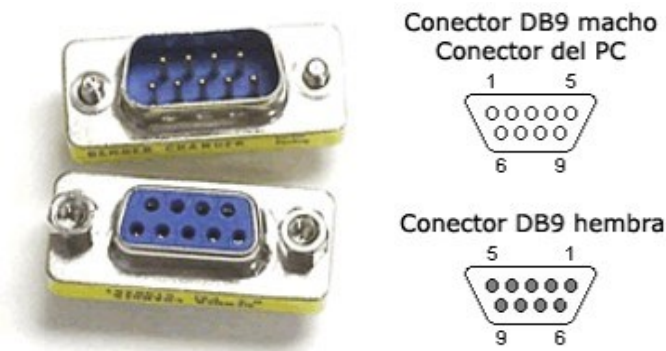


Fig. 3.12. Conectores DB-9 macho y hembra.

Tabla 3.2. Señales del conector DB -9

Terminal	Señal	Descripción
1	DCD	Detector de Portadora
2	RXD	Recepción de Datos
3	TXD	Transmisión de Datos
4	DTR	Terminal Listo
5	GND	Tierra
6	DSR	Datos Listos
7	RTS	Petición de Envío
8	CTS	Preparado para Transmitir
9	RI	Timbre Indicador

En la comunicación entre el ordenador y el dispositivo solo se usan los pines 2 y 3, o sea las señales de transmisión y recepción.

3.3.6.2 Niveles lógicos TTL y RS – 232

Para lograr la comunicación es necesario convertir los niveles de tensión TTL (Lógica Transistor -Transistor) hacia los niveles de tensión del estándar RS-232. En la tecnología TTL los niveles lógicos van de 0 V a 0.8 V para nivel bajo (0) y de 3.5 V a 5 V para nivel alto (1); mientras que en RS-232 las tensiones de -3 V a -15 V representan el nivel alto (1) y las tensiones de +3 V a +15 V representan el nivel bajo (0). Para lograr esta conversión se pueden emplear circuitos con componentes discretos o circuitos integrados; como es el caso del MAX232, el cual se emplea en el proyecto.

3.3.6.3 Circuito integrado MAX232

Este circuito integrado está diseñado para convertir directamente lógica TTL/CMOS a lógica RS-232 y viceversa, solamente se requieren 4 capacitores para lograr su funcionamiento. Internamente tiene dos convertidores que manejan 4 señales, dos de recepción y dos de transmisión. Entre ellas las señales de intercambio de estado, las que no son del todo imprescindibles. También se emplea un capacitor adicional entre el pin de alimentación y la tierra.

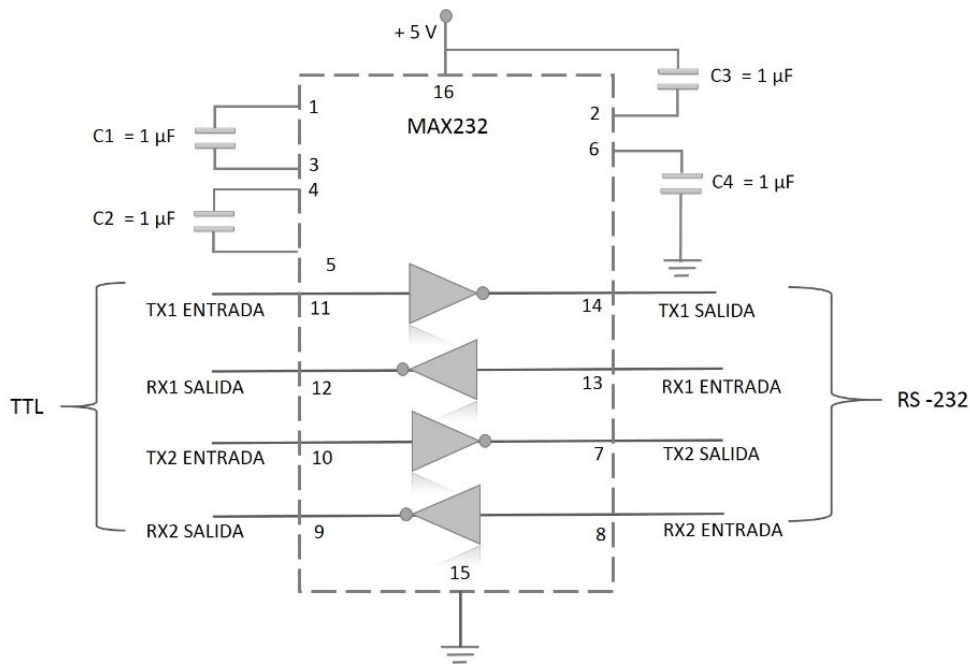


Fig. 3.13. Esquema del integrado MAX232.

3.3.7 Circuito de fuerza

El circuito para controlar el encendido y apagado de la fuente que alimenta la celda electrolítica cuenta con dos partes fundamentales: un relé que se encuentra en contacto directo con la fuente y un optoacoplador que aísla eléctricamente el microcontrolador de la etapa de potencia, con el objetivo de proteger al mismo de corrientes excesivas.

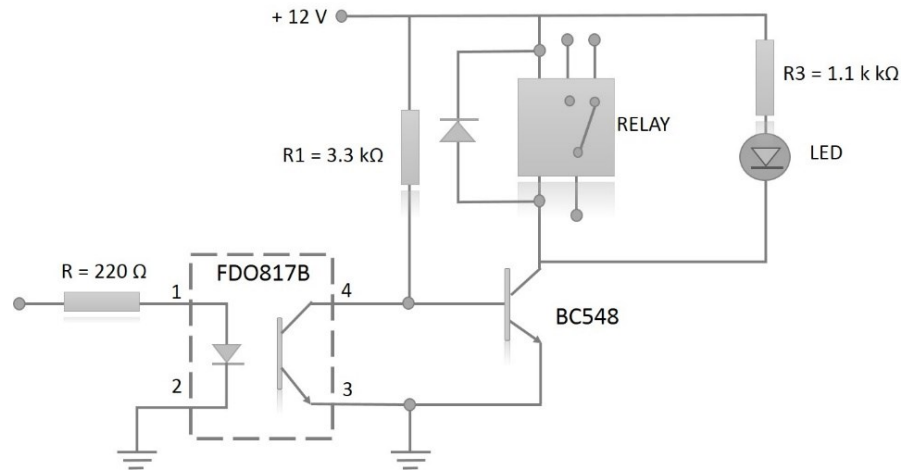


Fig. 3.14. Esquema del circuito de fuerza.

El control se implementó con lógica inversa: un nivel bajo '0' a la salida del microcontrolador activa el circuito de fuerza, mientras que un nivel alto '1' lo desactiva.

Cuando aparece un nivel alto en el terminal excitador el Led interno del optoacoplador se polariza, proporcionando el nivel de luz que satura al fototransistor, en la base del transistor aparece un nivel bajo y este se corta, de esta manera el relé no conduce ya que en el colector del transistor hay un nivel alto.

Cuando aparece un nivel bajo en la salida del terminal excitador ocurre todo lo contrario, el Led no se polariza y por tanto no satura al fototransistor, en la base del transistor aparece un nivel alto y este se satura, el relé conduce ya que en el colector del transistor aparece un nivel bajo.

La resistencia de polarización del Led se calculó para corriente de 4 mA, que brinda un voltaje de saturación igual a 10 mv (ver anexo 3).

$$R = \frac{V_{sal} - V_{Led}}{I_p} = \frac{1.45v - 0.55v}{4mA} = 220\Omega \quad (3.18)$$

3.3.8 Fuente de alimentación

Se necesita una fuente de alimentación que entregue los valores de tensiones que requieren todos los componentes del sistema. El sensor LM35, el AO LM324, el integrado MAX232 y display LCD LM016L funcionan con + 5 V, por otra parte el microcontrolador trabaja con +3,3 V y el relé del circuito de fuerza con + 12 V.

Para el diseño de la fuente se tomaron en cuenta estas tensiones. La tensión de entrada es generada por una fuente externa de + 12 V, esta tensión va hacia el regulador integrado L78S05 cuya salida es de + 5 V, la cual se dirige a la entrada del regulador integrado LD1117S33 que proporciona +3.3 V.

Ambos reguladores cuentan con capacitores de desacople a la entrada y capacitores a la salida para garantizar mejores respuestas transitorias y rechazo al ruido. Además en el L78S05 posee un diodo entre los terminales entrada y salida para proteger el integrado en caso de que accidentalmente se cortocircuite la entrada a tierra.

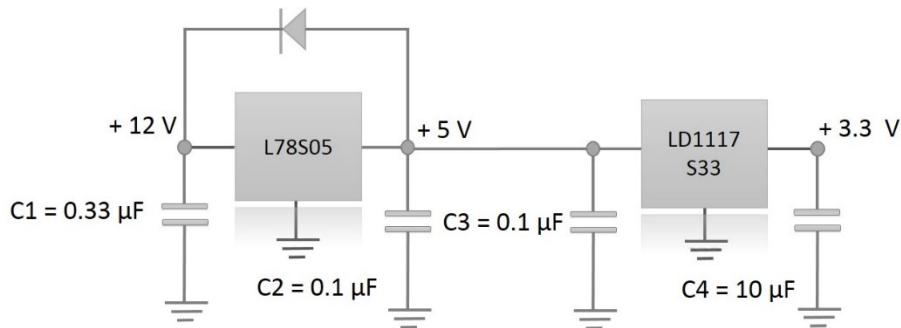


Fig. 3.15. Esquema de la fuente de alimentación.

A continuación se muestran las características principales de ambos reguladores.

Tabla 3.3. Características del Reguladores Integrados

Parámetros	L7805	LD1117S33
Voltaje de entrada	35 V	20 V
Voltaje de salida	5 V	3,3 V
Corriente de salida	1 A	0,8 A
Temperatura de trabajo	- 55 a +150 °C	-40 a +150 °C
Impedancia de salida	17 mΩ	-
Ruido a la salida	40 µV	100 µV

3.3.9 Diagrama de flujo del software (firmware)

El firmware diseñado se divide en dos partes, el programa principal y la atención a interrupciones. En el programa principal se inicializan las variables y los módulos que se van a utilizar, así como el ciclo infinito donde el sistema va a estar controlando la temperatura y guardando los intervalos de tiempo. Existen tres interrupciones principales, una generada por el primer temporizador cada un segundo para controlar el cronómetro, otra generada por el segundo temporizador cada medio segundo que controla la visualización y la transmisión de datos, la última interrupción es generada cuando se ha presionado uno de los botones. Para la programación se utilizaron los software *CCS* e *IAR Systems* ambos en lenguaje C. Debido a que el MSP430G2553 no tiene modelo de simulación la comprobación del firmware se realiza físicamente con el microcontrolador.

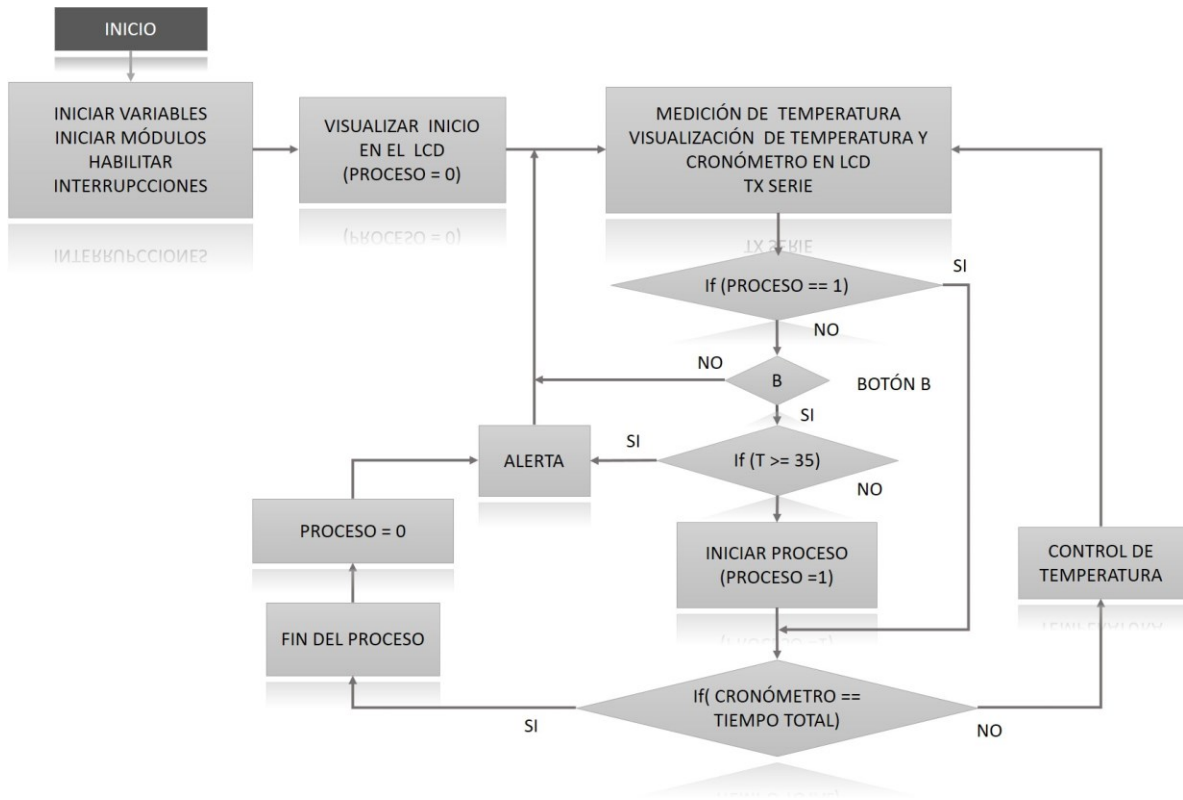


Fig. 3.16. Diagrama de flujo del programa principal.

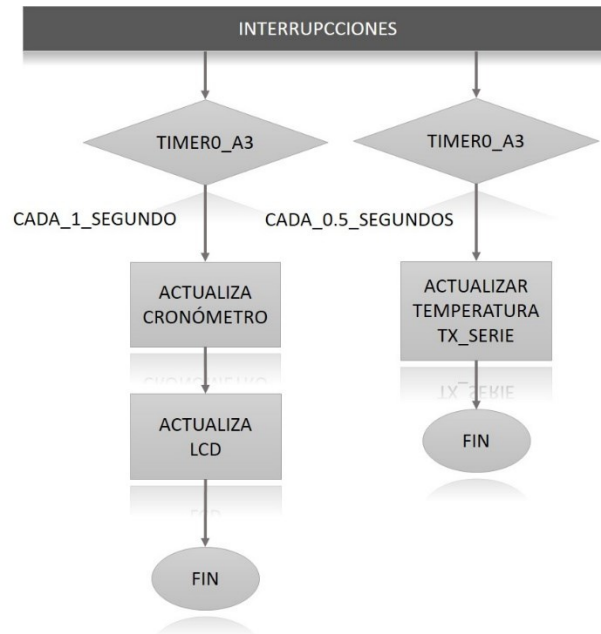


Fig. 3.17. Diagrama de flujo del sistema.

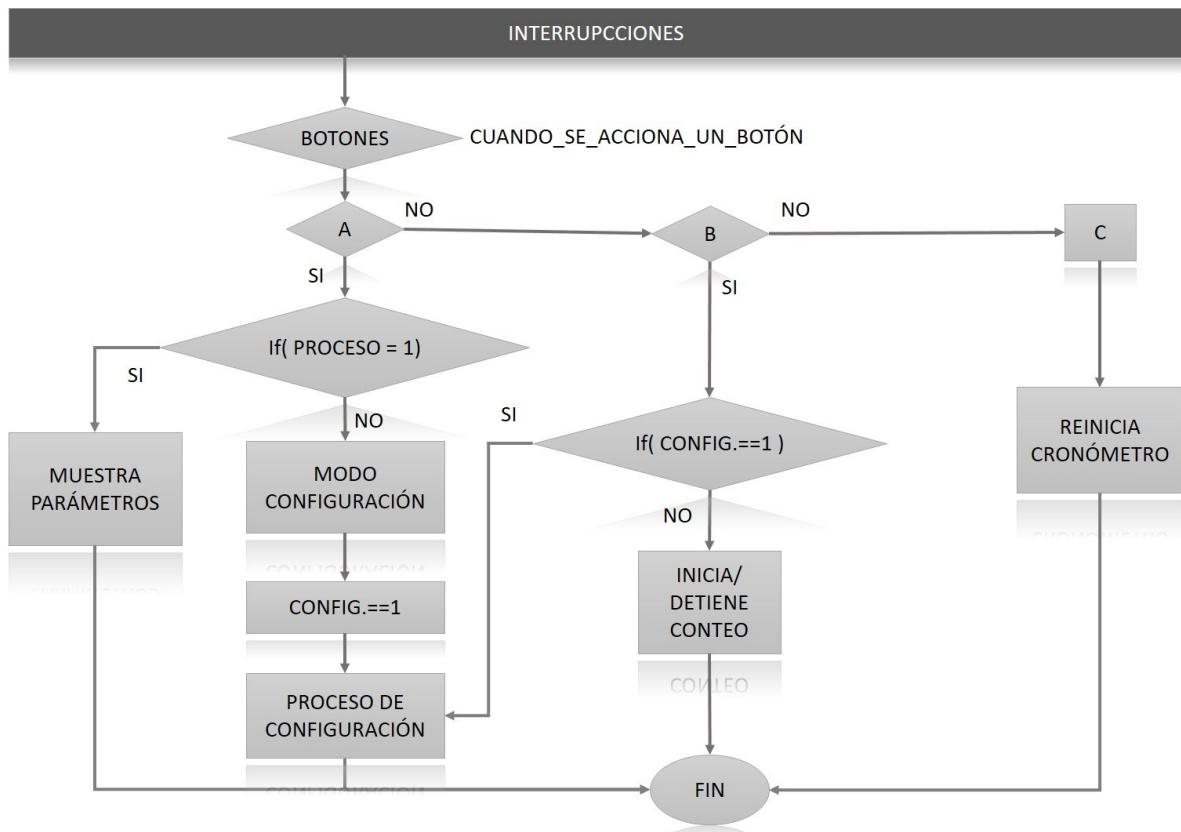


Fig. 3.18. Diagrama de flujo del sistema.

3.3.10 Configuración de terminales del microcontrolador

En la siguiente tabla se muestra la configuración de terminales del microcontrolador MSP430G2553 empleada en el diseño.

Tabla 3.4. Configuración de terminales del MSP430G2553

Terminales	Configuración	Terminales	Configuración
P1.0	LCD Data 7	P2.0	LCD Data 4
P1.1	RX Serie *	P2.1	LCD Data 5
P1.2	TX Serie *	P2.2	Botón A
P1.3	Botón B	P2.3	circuito de fuerza **
P1.4	Entrada de señal al ADC	P2.4	LCD Enable [E]
P1.5	LCD Data 6	P2.5	LCD Data/Command [RS]
P1.6	Buzzer	P2.6	XOUT
P1.7	Botón C	P2.7	XIN

* Están conectados al microcontrolador mediante un jumper.

** Se activa con nivel bajo.

3.4 Configuración interna del microcontrolador

En este epígrafe se muestra la configuración empleada en los puertos y módulos del microcontrolador además de los registros que intervienen en cada caso, (ver anexo 4).

3.4.1 Configuración del Sistema de Reloj

Tabla 3.5. Registro BCSCCTL1

Bits	Número	Valor	Comentario
DIVA	2	00	Divide la señal de reloj ACLK/1, en este caso equivale a 32768 HZ generada por el cristal externo.

Tabla 3.6. Registro BCCTL2

Bits	Número	Valor	Comentario
DCOCLK	2	00	Selecciona al DCO como fuente de reloj para la señal MCLK.*
DIVM	2	00	Divide la señal de reloj MCLK/1.
SELS	1	0	Selecciona al DCO como fuente de reloj para la señal MSCLK.
DIVS	2	00	Divide la señal de reloj MSCLK/1.

* La frecuencia del DCO se calibra por software a 8 MHz.

Tabla 3.7. Registro BCCTL3

Bits	Número	Valor	Comentario
LFXT1S	2	00	Selecciona al cristal externo como fuente de reloj para la señal ACLK.
XCAP	2	01	Fija la capacitancia efectiva vista por el cristal externo (~6 pf).

3.4.2 Configuración de los puertos P1 y P2

Tabla 3.8. Configuración del puerto P1

Registro	Valor (Hex)	Comentario
P1DIR	01100001 (0x61)	Selecciona como terminales de salida a P1.0, P1.5* y P1.6.
P1OUT	10001000 (0x88)	Habilita P1.3 y P1.7 como terminales de entrada.
P1REN	10001000 (0x88)	Habilita la resistencia <i>pull-up</i> de los terminales P1.3 y P1.7.

* Línea número 7 y 6 del LCD.

Tabla 3.9. Configuración del puerto P2

Registro	Valor (Hex)	Comentario
P2DIR	00001011 (0x82)	Selecciona como terminales de salida a P2.0, P2.1* y P2.3.

P2OUT	00000100 (0x04)	Habilita P2.2 como terminal de entrada.
P2REN	00000100 (0x04)	Habilita la resistencia <i>pull-up</i> del terminal P2.2.

* Línea número 4 y 5 del LCD.

3.4.3 Configuración del Timer0_A3

Tabla 3.10. Registro TA0CTL

Bits	Número	Valor	Comentario
TASSEL	2	01	Selecciona ACLK como señal de reloj del temporizador (32678 Hz).
ID	2	00	Divide la señal de reloj del temporizador (ACLK /1)
MC	2	01	Cuenta ascendentemente hasta alcanzar el valor de CCR0*.

* Guarda el valor de desbordamiento.

Tabla 3.11. Registro TA0CCTL0

Bits	Número	Valor	Comentario
CCIE	1	1	Habilita la Interrupción por desbordamiento.

Tabla 3.12. Registro TA0CCR0

Bits	Número	Valor	Comentario
CCR0	16	32767	Guarda el valor de desbordamiento de temporizador, en este de caso de 1s.

3.4.4 Configuración del Timer1_A3

Tabla 3.13. Registro TA1CTL

Bits	Número	Valor	Comentario
TASSEL	2	01	Selecciona ACLK como señal de reloj del temporizador (32678 Hz).
ID	2	00	Divide la señal de reloj del temporizador (ACLK /1)
MC	2	01	Cuenta ascendentemente hasta alcanzar el valor de CCR0*.

* Guarda el valor de desbordamiento.

Tabla 3.14. Registro TA1CCTL0

Bits	Número	Valor	Comentario
CCIE	1	1	Habilita la Interrupción por desbordamiento.

Tabla 3.12. Registro TA1CCR0

Bits	Número	Valor	Comentario
CCR0	16	16383	Guarda el valor de desbordamiento de temporizador, en este de caso de 0.5s.

3.4.5 Configuración del conversor Analógico – Digital

Tabla 3.15. Registro ADC10CTL0

Bits	Número	Valor	Comentario
SREF	3	001	Define el voltaje de referencia desde Vref a GND.
ADC10SHT	2	01	Retención de muestra (4xADC10CLK)
REF2_5	1	1	Selecciona Voltaje de Referencia interno (Vref = 2,5 volt).
REFON	1	1	Activa Referencia interna.

Tabla 3.16. Registro ADC10CTL1

Bits	Número	Valor	Comentario
INCH	4	0100	Entrada por el canal 4 del ADC10 (P1.4)
ADC10SC	2	00	Selecciona al oscilador interno del ADC como fuente de reloj de la retención de muestra (ADC10CLK 5 MHZ).
ADC10DIV	3	100	Divide la señal de reloj del ADC/5.
ADC10SSEL	2	01	Selecciona como señal de reloj del ADC a ACLK.

Tabla 3.17. Registro ADC10AE0

Bits	Valor	Comentario
8	00010000	Selecciona a P1.4 como entrada analógica

3.4.6 Configuración del módulo UART

Tabla 3.18. Registro UCA0CTL0

Bits	Número	Valor	Comentario
UCPEN	1	1	Activa el bit de paridad en la transmisión.
UCPAR	1	1	Selecciona paridad "1".
UCMODE	2	00	Selecciona el modo UART de módulo USCI_A0.

Tabla 3.19. Registro UCA0CTL1

Bits	Número	Valor	Comentario
UCSSEL	2	11	Selecciona SMCLK como señal de reloj del módulo.

Tabla 3.20. Registro UCA0BR0

Bits	Valor	Comentario
8	160	Parte baja del número 416 en binario (valor de la división entre 8000000/19200).*

Tabla 3.21. Registro UCA0BR1

Bits	Valor	Comentario
8	1	Parte alta del número 416 en binario (valor de la división entre 8000000/19200).

* Tasa de TX-RX igual a 19200 bps.

Tabla 3.22. Registro UCA0CMTL

Bits	Número	Valor	Comentario
UCBRS	3	110	Controla la modulación individual de cada bit.

3.5 Diseño del circuito impreso

Para el diseño del circuito impreso PCB (*Printed Circuit Board*) se utilizó el entorno de desarrollo ARES (*Advanced Routing and Editing Software*) del software Proteus 8 Professional. El ARES es una herramienta especializada en el enrutamiento y la ubicación de componentes electrónicos, permite la edición de capas superficiales, capas de soldaduras entre otras. Para el proyecto se tuvieron en cuenta las reglas del diseño de PCB aunque el ARES realiza el enrutamiento automáticamente se hicieron algunos retoques finales.

El sistema está compuesto por cuatro módulos, uno es para el núcleo que es donde se encuentran el microcontrolador, el acondicionador de nivel, la fuente de alimentación y todos los elementos para la comunicación; uno para los botones, uno para el circuito que acompaña al sensor LM35 y por último uno para el circuito de fuerza. De esta forma en caso de alguna reparación o ajuste se tienen por separado los circuitos y se puede operar de una manera más eficiente.

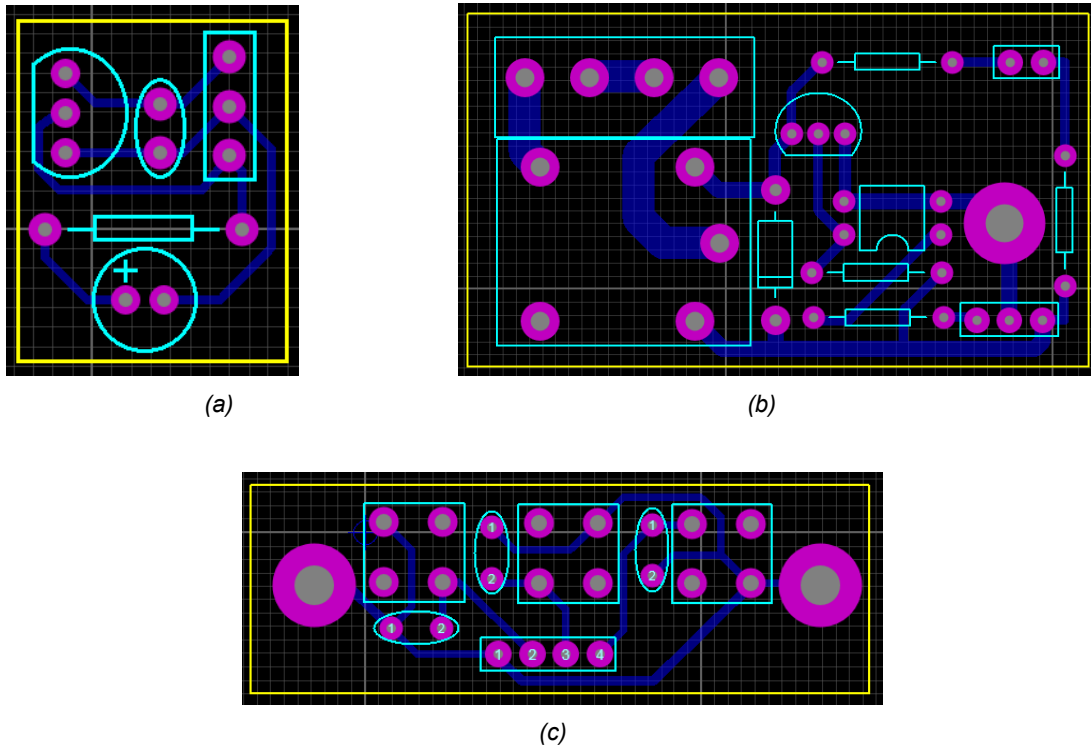


Fig. 3.19. Circuito impreso: Sensor LM35 (a), Circuito de fuerza (b) y Teclado(c).

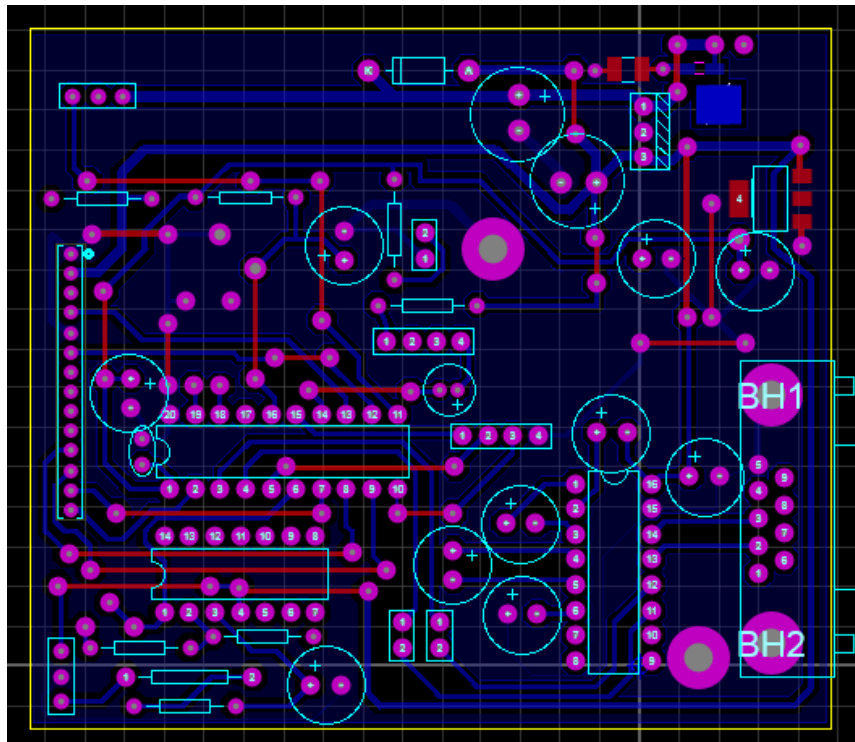


Fig. 3.20. Circuito impreso del núcleo del sistema.

3.6 Montaje del Controlador Digital v1.0

A continuación se muestra el montaje realizado del sistema de control.

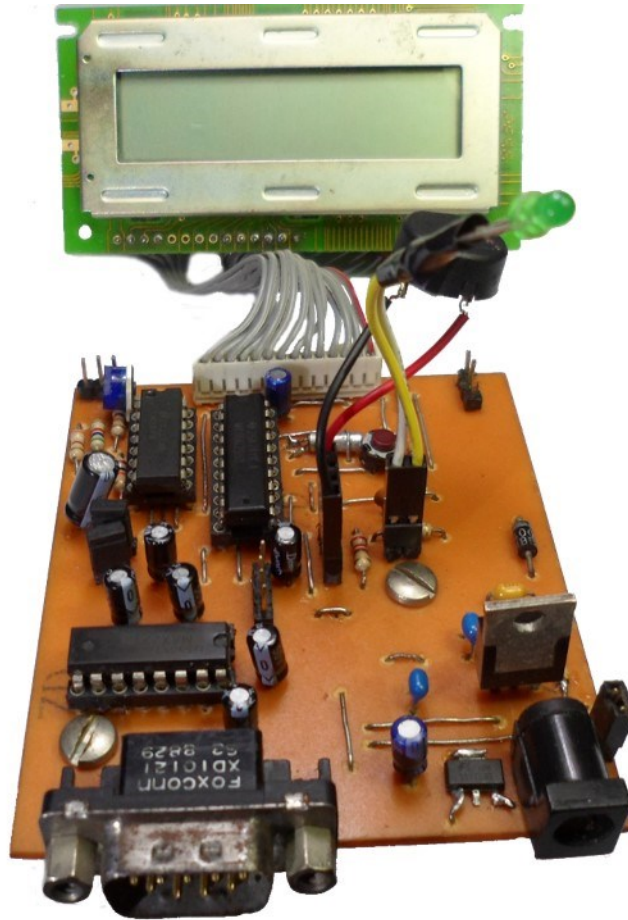


Fig. 3.21. Montaje del núcleo del sistema.



Fig. 3.22. Montaje del teclado y el sensor.

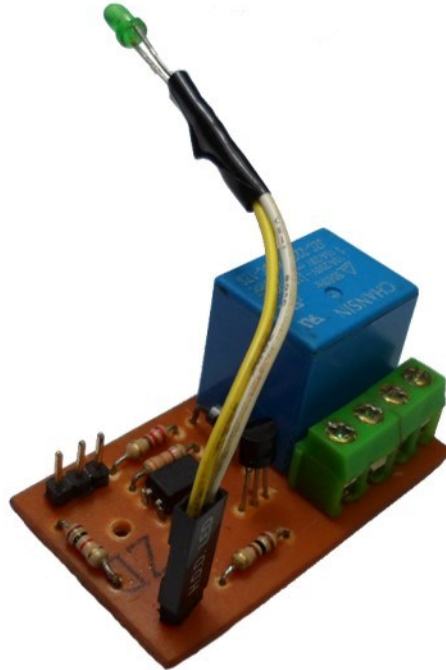


Fig. 3.23. Montaje del circuito de fuerza.

3.7 Manual de Usuario

En este epígrafe se muestra una guía detallada del funcionamiento y configuración del dispositivo.

1. Al conectar el dispositivo a la alimentación se visualiza en pantalla un cartel de identificación, con el nombre y la versión del dispositivo (Controlador Digital v1.0). Pasado 2 segundos aparece un nuevo cartel identificando que el dispositivo está cargando el sistema.



Fig. 3.24. Pantalla de inicio del Controlador Digital v1.0.

2. Una vez mostradas estas visualizaciones ya el sistema está cargado, y aparece la pantalla principal; donde se muestra la temperatura y el cronómetro que indica el

tiempo del proceso. La primera línea del display se actualiza cada 0.5 segundos y la segunda línea se actualiza cada 1 segundo.



Fig. 3.25. Pantalla principal.

3. Si se presiona el botón A (Configuración), el dispositivo muestra un cartel indicando que está en modo de configuración. Luego de 2 segundos aparece en pantalla una interfaz de configuración para establecer el valor de corriente que pasará por los electrodos. Los valores son: 1, 2, 5 y 10 amperes; el cursor intermitente inicialmente se encuentra en el valor de 1 ampere. Con el botón B (Inicio/Parada/Desplazamiento) se desplaza el cursor hacia la derecha, de esta forma se puede elegir cualquiera de los valores visualizados. En modo de configuración el botón C (Reinicio de tiempo) no tiene funcionalidad en esta etapa.



Fig. 3.26. Etapa 1 de configuración del dispositivo.

4. Si se presiona el botón A nuevamente, el valor que indique el cursor será guardado y aparecerá en pantalla la interfaz de configuración de la carga total aplicada a la celda electrolítica. En dependencia del valor de corriente seleccionada, aparecerá

en pantalla una pareja de valores de carga, para más información (ver anexo 4). El botón B mantiene su función.



Fig. 3.27. Etapa 2 de configuración del dispositivo.

5. Para guardar el valor seleccionado de carga se presiona el botón A, seguidamente aparecerá un cartel indicando que los parámetros fueron guardados correctamente, luego de 2 segundos se mostrará en pantalla el tiempo en horas que tomará el proceso siempre y cuando estén energizados los electrodos. Después de 4 segundos el sistema retornará a la pantalla principal.

Si se omite el paso de configuración, los valores por defecto de corriente y carga total serán 1 A y 8 A/h respectivamente.



Fig. 3.28. Etapa 3 de configuración del dispositivo.

6. Una vez en la pantalla principal, si se presiona el botón B el dispositivo entra en Modo Activo, este indica el inicio del proceso, por tanto comienza el conteo y se energizan los electrodos, siempre que la temperatura no exceda los 35 °C (ver Figura 3.29). Si se presiona el botón A en este modo, se visualiza por 2 segundos en la primera línea del display los valores de corriente y carga total guardados en la memoria del dispositivo (ver Figura 3.30).

Cuando se haya cumplido el tiempo total del proceso el dispositivo detiene la alimentación de los electrodos y emite una alarma.



Fig. 3.29. Cartel indicando que el proceso no puede comenzar debido a la temperatura.



Fig. 3.30. Valores de carga total y corriente del proceso actual.

7. Una vez cargado el sistema el dispositivo está en constante transmisión de datos hacia el ordenador. La transmisión se realiza cada 0.5 segundos e indican cuando el dispositivo está en Modo Activo o Modo de Configuración.

3.8 Software para la adquisición de datos

Para capturar los datos que envía el sistema de control por el módulo UART se diseñó un software basado en interrupciones desarrollado totalmente en LabWindows/CVI 2010. Este permite visualizar la temperatura de la celda, los parámetros actuales de intensidad de corriente y carga aplicada a los electrodos, el estado del cronómetro y de la fuente de alimentación. Cuenta además con grafica en tiempo real de la temperatura capturada y las temperaturas 35 y 30 °C.

El sistema transmite cada 0.5 segundos una trama de 11 bytes con información del proceso, esta trama genera una interrupción al llegar al puerto serie del ordenador indicándole al mismo que hay datos en el buffer de recepción.

El software diseñado se encarga de abrir, configurar el puerto y procesar la información recibida. La función encargada de generar la interrupción es la siguiente:

```
InstallComCallback (1, eventMask, notifyCount,eventCharacter, Recibir_Datos, NULL);
```

El primer elemento de la función indica que se está utilizando el puerto COM1, los 3 que le siguen configuran la interrupción; el parámetro notifyCount es igual a 11, de esta forma cuando en el puerto se halla recibido 11 bytes el ordenador ejecuta la función de atención a interrupción que en este caso es Recibir_Datos.

A continuación se muestra una imagen del software tomada en pleno funcionamiento.

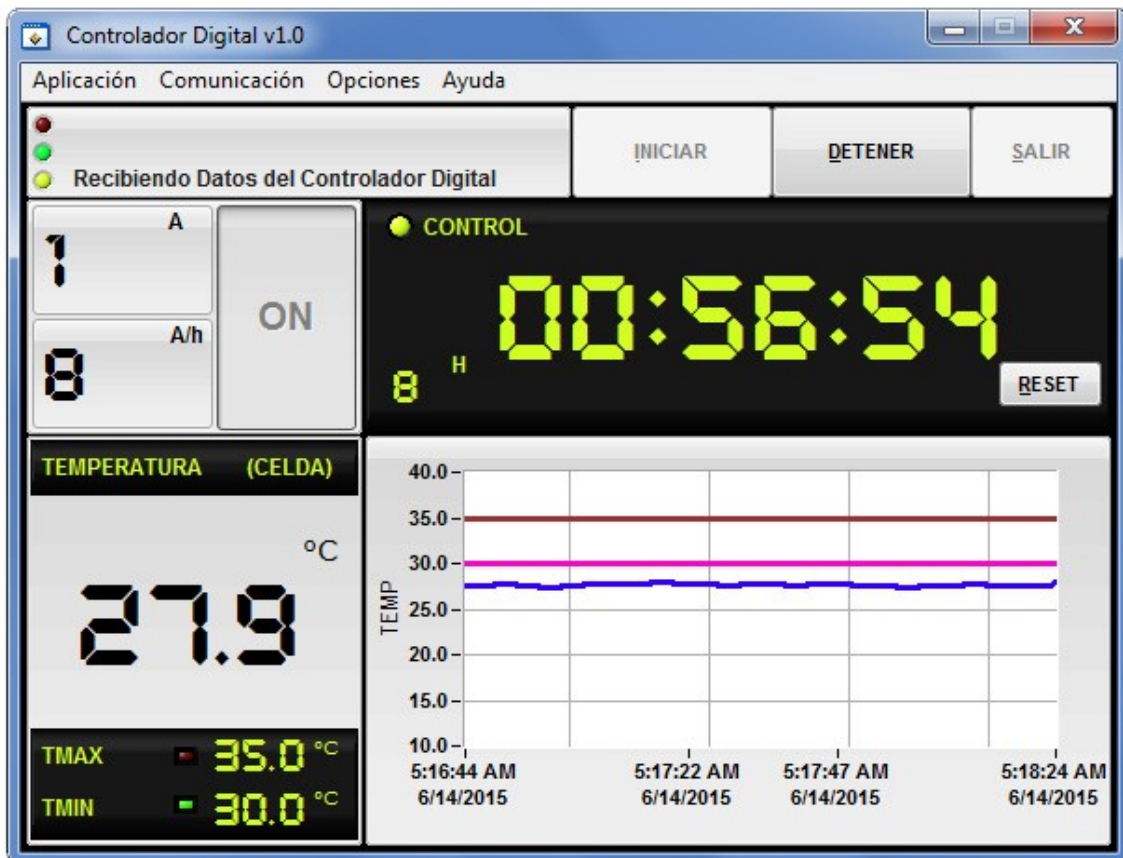


Fig. 3.31. Software desarrollado en LabWindows/CVI 2010 para la adquisición de datos.

3.9 Valoración económica

A continuación se muestra la valoración económica del diseño propuesto.

Tabla 3.23. Precios de componentes empleados

Componente	Cantidad	Precio (USD)	Total
MSP430G2553	1	2.15	2.15
LCD LM016L	1	10.95	10.95
Sensor LM35	1	6.25	6.25
LM324	1	0.50	0.50
MAX232	1	4.05	4.05
L7805	1	0.35	0.35
LD1117S33	1	1.10	1.10
Optoacoplador 817B	1	3.10	3.10
Cristal de cuarzo de 32768 Hz	1	1.19	1.19
Buzzer	1	0.70	0.70
Led SMD	1	0.35	0.35
Led	2	0.14	0.28
Resistores ½ W	13	0.07	0.91
Resistores SMD	1	0.10	0.10
Potenciómetro	1	0.95	0.95
Diodos	2	0.20	0.40
Capacitores electrolíticos	13	0.16	2.08
Capacitores De cerámica	5	0.12	0.60
Transistor BC548	1	0.25	0.25
Relé	1	2.60	2.60
Interruptor <i>Push-Button</i> 2PIT Cuadrado	4	1.35	5.40
Base – 7 pines (Soldier Tail)	1	0.10	0.10
Base – 8 pines (Soldier Tail)	1	0.10	0.10
Base – 20 pines (Soldier Tail)	1	0.15	0.15
DB-9 RS -232	1	0.80	0.80
PCB 8x12 cm	1	1.35	1.35
Total	-	-	46.76

El costo del dispositivo oscila alrededor de los 45.00 USD, pero este valor puede cambiar en dependencia del proveedor. La revisión de los precios se realizó por los catálogos “*Mouser Electronics*” y “*Electronix Express*”.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- 1- Se diseñó e implementó un sistema de control para el proceso de obtención de Hipoclorito de Sodio mediante electrólisis con el microcontrolador MSP430G2553.
- 2- Se demostró la versatilidad de los microcontroladores MSP430 para realizar tareas de instrumentación electrónica.
- 3- Todos los microcontroladores de la familia MSP430 tienen la misma arquitectura pero se escogió el MSP430G2553 porque las prestaciones que ofrece se adaptan eficientemente a los requerimientos del diseño propuesto.
- 4- Para la visualización se escogió un visualizador LM016 pues permite representar mayor cantidad de información en comparación con los visualizadores 7 segmentos, además su manejo resulta menos complejo por parte del microcontrolador.
- 5- Se crearon librerías para el trabajo con visualizadores LCD y puertos del microcontrolador MSP430G2553.
- 6- Se comprobó que el cable apantallado desde el sensor LM35 al sistema, en complemento con el circuito de desacople, reducen de manera considerable los errores en la medición.
- 7- Se diseñó un software en LabWindows/CVI 2010 que permite la comunicación entre el sistema de control y un ordenador empleando para ello el puerto serie COM1.
- 8- Los costos están dentro del valor accesible para la construcción del sistema de control teniendo en cuenta las ventajas que este brinda. Además pueden ser asumidos por cualquier persona, empresa o institución que desee implementar la fabricación a una mayor escala de este diseño.
- 9- Se comprobó el funcionamiento del sistema de control obteniéndose excelentes resultados.
- 10- Este documento constituye un material de estudio y guía práctica para posteriores proyectos con microcontroladores MSP430.

Recomendaciones

1. Realizar pruebas con el dispositivo y comprobar la concentración de Hipoclorito de Sodio.
2. Agregar al dispositivo un módulo que permita medir la corriente a través de los electrodos, con el objetivo de hacer más eficiente el control del proceso.
3. Agregar al diseño un módulo de comunicación inalámbrica Bluetooth, que permita integrarlo a los sistemas actuales de telecomunicaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. Rojas Sixto Guevara, "Celdas Electrolíticas Para La Producción In Situ de Hipoclorito de Sodio," Lima, 2002.
- [2] R. Chang, "Electroquímica," 2007.
- [3] R. Cortón Hing y R. Tamayo Matos, Aspectos Fundamentales de la Química Física Tomo 2, La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1990.
- [4] M. A. Hani Rodríguez, "Utilización de un sistema híbrido basado en filtración con membranas y electrooxidación avanzada para depurar efluentes complejos," 2009.
- [5] N. J. Scenna y J. R. Vega, Modelado, Simulación y Optimización de Procesos Químicos, 1999.
- [6] S. Gomáriz Castro, Teoría de Control y Diseño Electrónico, 1997.
- [7] C. A. Smith and A. B. Corripio, Principles and Practice of Automatic Process Control, 1991.
- [8] J. Arántegui, Control de Procesos, 2011.
- [9] U. Teran Jurado, D. Hernández Zargoza and J. C. Pantoja Hernández, "Control de Temperatura para un Invernadero Utilizando el microcontrolador PIC16F877A," 2010.
- [10] G. Litovsky, Beginning Microcontrollers with the MSP430 Tutorial.
- [11] Instruments, Texas, "MSP430G2553 Datasheet," Texas, 2011.
- [12] K. Ogata, Sistemas de Control en Tiempo Discreto, 1996.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

A – Amperes

A/h – Ampere/ horas

ADC – Convertidor Analógico – Digital

AO – Amplificador Operacional

ASCII – Código Estándar Estadounidense para el intercambio de Información

BGA – *Ball Grid Array*

CCS – *Code Composer Studio v5*

CG RAM – *Character Generator RAM*

DD RAM – *Display Data RAM*

FLL – *Frequency Locked Loop*

IAR – *System Imagine Craft*

IrDA – *Infrared Data Association*

JTAG – *Joint Test Action Group*

LCD – *Liquid Crystal Display*

MIPS – *Millions of Instructions Per Second*

PCB – *Printed Circuit Board*

RISC – *Reduced Instruction Set Computer*

RS – 232 – *Recommended Standard – 232*

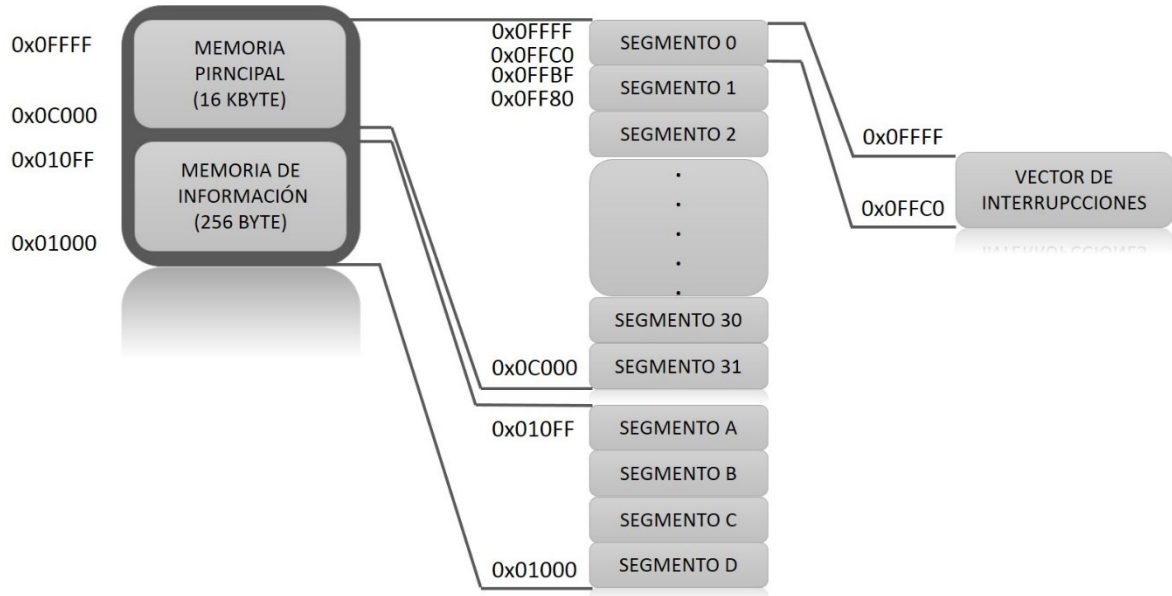
RX – Recepción de datos

SVS – Sistema Supervisor de Voltaje

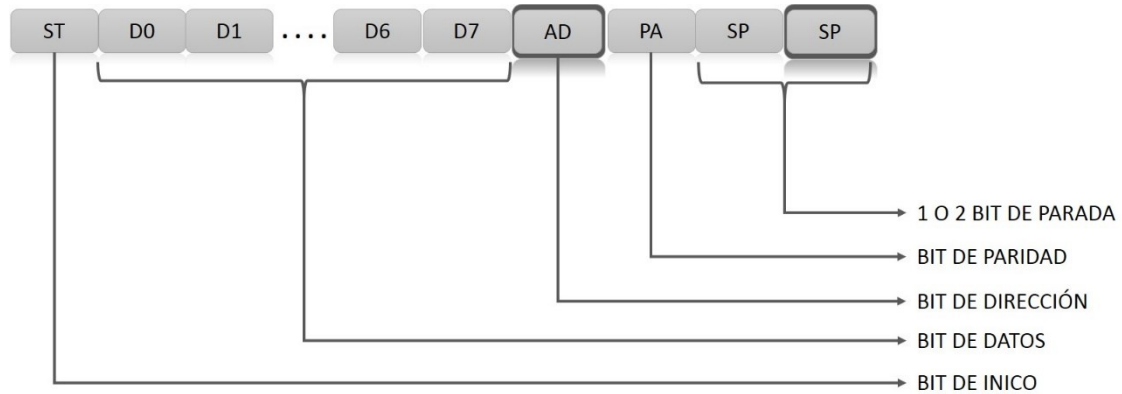
TX – Transmisión de datos

ANEXOS

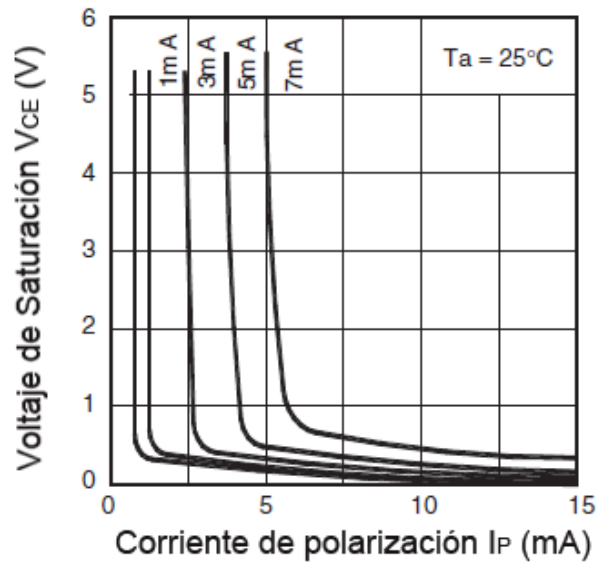
Anexo I Esquema en bloques de la memoria flash del MSP430G2553



Anexo II Formato de trama del módulo UART



Anexo III Voltaje de Saturación Colector Emisor vs Corriente de polarización del optoacoplador 817B.



Anexo IV Valores de carga total en dependencia de la corriente seleccionada.

Corriente (A)	Carga Total (A/h)
1	8 y 20
2	20 y 40
5	80 y 120
10	100 y 240

Anexo V Configuración de terminales del microcontrolador MSP430G2553.

