

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica



**Automatización del Proceso de Creación de Nanotubos de Carbono por el
Método de Arco Eléctrico**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero
Electrónico con el grado académico de Licenciatura**

Jairo Alonso Carranza Barrantes

Cartago, Junio de 2010

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN TRIBUNAL
EVALUADOR

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniería Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



Ing. Javier Pérez Rodríguez

Profesor lector



Alfonso Chacón Rodríguez

Profesor lector



Ing. Juan Carlos Jiménez

Robles Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería

Cartago, 24 de Junio 2010

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 13-junio-2010



Firma del autor

Jaira Alonso Carranza Barrantes

Céd: 4-0183-0578

Resumen:

Para producir nanotubos de carbono (NTC) en el Laboratorio Nacional de Nanotecnología (LANOTEC), con el método de descarga de arco voltaico, se utilizaba una máquina de soldar Miller tipo TIG, en la que se adaptaban dos electrodos de grafito. La chispa se producía al acercarse los dos electrodos. En presencia de un gas inerte como el argón, se creaba el plasma. El plasma lograba que el grafito pasara a un estado de sublimación, adoptando nuevas formas, entre ellas las de tubos cilíndricos conocidos como nanotubos de carbono.

El proceso se realizaba a mano, por lo que la distancia entre ánodo y cátodo no era constante durante todo el movimiento del electrodo a causa del desgaste del ánodo y la imprecisión del operador. Por esa razón se interrumpía el arco eléctrico y el plasma. El problema era que al obtener una primera muestra, no se podía comparar directamente con otra recolectada en una segunda fase, porque no se llevaron a cabo de la misma manera. Además si el arco eléctrico hubiera sido constante durante todo el recorrido, aumentaría la cantidad de nanotubos obtenidos, optimizando el rendimiento de la producción.

Para conseguir muestras constantes cada vez que se realizara la producción, se adecuaron tres motores distribuidos de la siguiente forma: un motor a pasos para girar el cátodo sobre su propio eje, un servomotor AC que acercara o alejara el ánodo conforme este se estuviera desgastando y por último otro servomotor AC que moviera el ánodo desde el centro del cátodo hacia fuera.

Palabras clave: Nanotubos de carbón; TIG; NTC; Arco eléctrico; Electrodo; Ánodo; Cátodo; Servomotor.

Abstract:

In order to produce carbon nanotubes at the National Nanotechnology Laboratory (LANOTEC), the electric discharge method is used with a Miller TIG welding machine, with two electrodes made of graphite. When the electrodes are near each other a spark is produced; argon is used as an inert gas and in the presence of the arc, plasma is created. Plasma implies the sublimation of graphite and this takes new shapes, among them cylindrical tubes known as carbon nanotubes.

The process used to be done by hand, which means that the distance between the electrodes was not constant during the procedure because of the consumption of the anode and the interruptions in the arc and the plasma. The resulting problem was that no two samples were comparable because of the inconsistency in the process. Besides, with a constant electric arc during the process, the amount of nanotubes would raise, improving the performance of the production.

In order to get constant samples each time, three motors were adapted, and distributed as follows: a stepper motor for spinning the cathode over its vertical axis, an AC servomotor to close or pull up the anode as it is consumed, and finally another servo for moving the anode from the center to the side of the cathode.

Keywords: Carbon nanotube; TIG; CNT; Electric arc; Electrode; Anode; Cathode; Servomotor.

Dedicatoria:

Este trabajo esta dedicado a mi mamá, la que nunca dejó que abandonara y me mandó a dormir temprano. Por ella soy todo lo que soy, le atribuyo todos mis éxitos. Este es todo tuyo. Finalmente se acabó.

Agradecimiento:

Agradezco al Dr. José Roberto Vega Baudrit por darme la oportunidad de elaborar mi proyecto de graduación en el LANOTEC.

También al Profesor Fernando Villalta por toda la ayuda brindada y por el trabajo sin esperar nada a cambio.

Agradezco al profesor Juan Carlos Jiménez por tener la paciencia de leer y evaluar mis informes.

Agradezco al profesor Alfonso Chacón por recordarme que siempre se puede dar un poco más.

INDICE GENERAL

Capítulo 1:	Introducción	12
1.1.	Problema existente e importancia de su solución	12
1.2.	Resumen de la solución seleccionada	14
Capítulo 2:	Meta y objetivos	16
2.1.	Meta	16
2.2.	Objetivo general	16
2.3.	Objetivos específicos	16
a.	<u>Objetivos de hardware</u>	16
b.	<u>Objetivos de software</u>	17
c.	<u>Objetivos de implementación</u>	17
Capítulo 3:	Marco teórico	18
3.1.	Descripción del sistema o proceso a mejorar:	18
3.2.	Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos	18
3.2.1.	Definición de un nanotubo de carbono	18
3.2.2.	Propiedades y aplicaciones	19
3.2.3.	Métodos más utilizados para la creación de nanotubos	20
3.2.4.	Efecto Hall	21
3.2.5.	Resistor regenerativo	21
Capítulo 4:	Procedimiento metodológico	22
4.1.	Procedimiento para la descarga de arco eléctrico.....	22
4.1.1.	Características clave del proceso actual	23
4.1.2.	Efectos nocivos	25
4.2.	Obtención y análisis de información	25
4.3.	Evaluación de alternativas y síntesis de la solución.	27
4.3.1.	Evaluación de las alternativas para la solución.	27
4.3.2.	Síntesis de la solución.	31
4.4.	Implementación de la solución.	32
Capítulo 5:	Descripción detallada de la solución	35
5.1	Descripción del hardware	35
5.1.1.	Sensores.....	35
5.1.2.	Aislamiento y conexiones de los motores	39
5.1.3.	Conexiones de los microcontroladores PIC	46
5.1.4.	Alimentación eléctrica	47
5.2.	Descripción del software	49
5.2.1.	Programa en la computadora	50
5.2.2.	Programa del PIC I.....	52
5.2.3.	Programa del PIC II.....	55
Capítulo 6:	Resultados y análisis	59
6.1.	Resultados.....	59
6.1.1.	Resultados preliminares	59
6.1.2.	Resultados definitivos	63
6.2.	Análisis	70

a. <u>Corriente</u>	70
b. <u>Consumo del electrodo</u>	70
c. <u>Temperatura</u>	71
d. <u>Filtrado</u>	71
e. <u>Problemas generales</u>	72
Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones	73
7.1. Conclusiones	73
7.2. Recomendaciones	74
Capítulo 8: Bibliografía	75
Apéndices	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Aparatos utilizados en el método de la descarga por arco	12
Figura 1.2	Cátodo de grafito utilizado en el proceso	13
Figura 1.3	Movimientos necesarios.....	14
Figura 3.1	Diferentes formas que puede tomar el carbón.	19
Figura 3.2	Estructura de un nanotubo multicapa.....	20
Figura 4.1	Etapas del proceso	23
Figura 4.2	Representación modular del sistema	31
Figura 4.3	Diagrama de primer nivel de las partes del sistema.	33
Figura 5.1	Señales y configuración interna de los interruptores ópticos.	36
Figura 5.2	Configuración básica del sensor de temperatura.	36
Figura 5.3	Amplificador no inversor.....	37
Figura 5.4	Circuito para la conexión del sensor de CD	38
Figura 5.5	Conexión del sensor con el cable de poder.....	38
Figura 5.6	Conexión física del sensor H970LCA.....	39
Figura 5.7	Posibles conexiones entre el servo amplificador y el control.	40
Figura 5.8	Conexiones del servo drive 2 con la etapa de control	41
Figura 5.9	Voltaje colector-emisor versus corriente de base.	41
Figura 5.10	Aislamiento de las etapas de potencia y control dentro del servo	42
Figura 5.11	Diagrama de conexión interna de las salidas	43
Figura 5.12	Corriente de entrada vs. corriente de salida	44
Figura 5.13	Conexión de los optoacopladores	44
Figura 5.14	Configuración interna de uno de los arreglos del ULN2803.....	45
Figura 5.15	Conexión del ULN2803 con el motor y la fuente	46
Figura 5.16	Conexiones del PIC 1 con el resto de los componentes.....	46
Figura 5.17	Conexiones del PIC 2 con el resto de los componentes.....	47
Figura 5.18	Creación de una tierra virtual	48
Figura 5.19	Diagrama de la distribución de voltajes en la parte digital	49
Figura 5.20	Diagramas de flujo del software en la computadora	51
Figura 5.21	Diagrama de flujo del PIC 1	54
Figura 5.22	Interrupciones del PIC I.....	55
Figura 5.23	Rutinas de atención de interrupciones PIC II	57
Figura 5.24	Diagrama de flujo de los programas del PIC II	58
Figura 6.1	Comportamiento de la corriente	62
Figura 6.2	Corriente en un proceso más largo	63
Figura 6.3	Espirales a diferentes tiempos	66
Figura 6.4	Comparación de las espirales reales contra las de computadora.....	67
Figura 6.5	Temperatura en tres procesos distintos	68
Figura 6.6	Algodón con residuos de carbono.....	69

ÍNDICE DE TABLAS

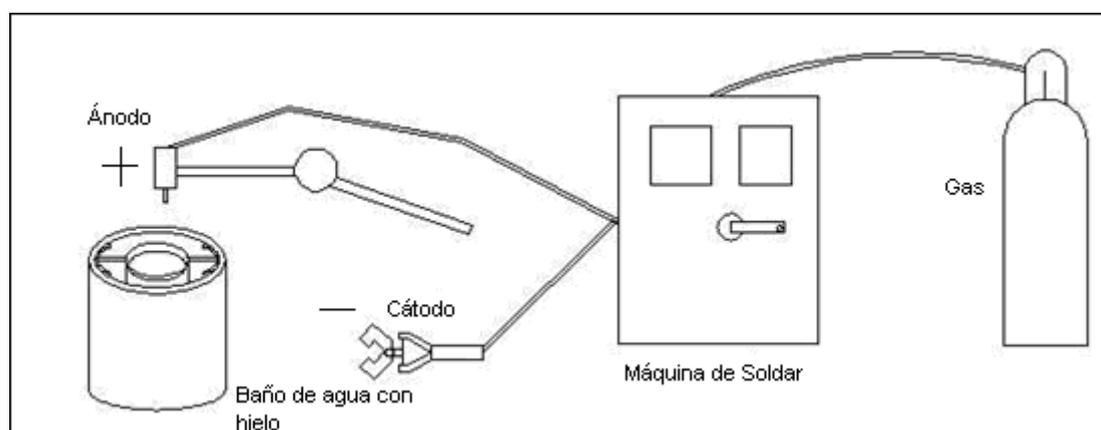
Tabla 4.1	Tipos de configuraciones posibles para montar los motores	28
Tabla 4.2	Tipos de motores que se podían adaptar al sistema	29
Tabla 4.3	Diferentes opciones de sensores para la medición de la altura	29
Tabla 4.4	Posibles controladores para los motores.....	30
Tabla 4.5	Opciones para la extracción de los humos.....	30
Tabla 5.1	Valores de los componentes y puntos de operación del circuito de aislamiento y el motor a pasos.....	45
Tabla 5.2	Niveles de voltaje para la alimentación	48
Tabla 6.1	Efectos de una señal de control incorrecta.....	62
Tabla 6.2	Desgaste del electrodo.....	64
Tabla 6.3	Porcentajes obtenidos en el filtro respecto al material consumido.....	69

Capítulo 1: Introducción

En este capítulo se explica cuál es el problema de fondo en la creación de nanotubos de carbono (NTC), en el Laboratorio Nacional de Nanotecnología, y qué tipos de mejoras se podrían obtener al darle una solución adecuada al problema. En una segunda parte se describe el enfoque general que se le dio a la solución.

1.1. Problema existente e importancia de su solución

En el Laboratorio Nacional de Nanotecnología se utiliza una adaptación del método de descarga de arco voltaico para crear nanotubos de carbono. Para ello básicamente se necesita una máquina de soldar en la que se encuentre conectada una varilla larga de grafito (ánodo) y un cilindro grueso también de grafito (cátodo) puesto a la terminal negativa, este último sumergido en agua con hielo para que el choque térmico al que se ve expuesto el grafito sea mayor (figura 1.1).



(Fuente LANOTEC)

Figura 1.1 Aparatos utilizados en el método de la descarga por arco

En la figura 1.2 se presentan el cátodo y el ánodo de grafito utilizados en el proceso: el primero tiene un diámetro de 5cm y una altura aproximada de 30cm; el ánodo tiene 1/8 de pulgada de grosor y 32mm de largo.



(GIMP)

Figura 1.2 Cátodo de grafito utilizado en el proceso

Al igual que en la soldadura tradicional, una persona sostiene el ánodo y lo va acercando conforme se va desgastando. El proceso libera grandes cantidades de calor, y por esa razón el encargado de mover el instrumento debe vestir guantes y un delantal de cuero para protegerse de quemaduras. También se tiene que usar un visor con filtro para soldadura, para proteger la vista de las emisiones ultravioleta. Además se utiliza una mascarilla para polvos que cubre la nariz y la boca, la cual evita que micro partículas ingresen por las vías respiratorias, porque teóricamente se suele comparar la forma de los nanotubos con la de los asbestos [1]. Toda esta instrumentación que se debe vestir, hace muy difícil para una persona sostener el ánodo de manera tal que el arco eléctrico no se interrumpa en ningún momento, y menos aún que la distancia entre electrodos sea la misma.

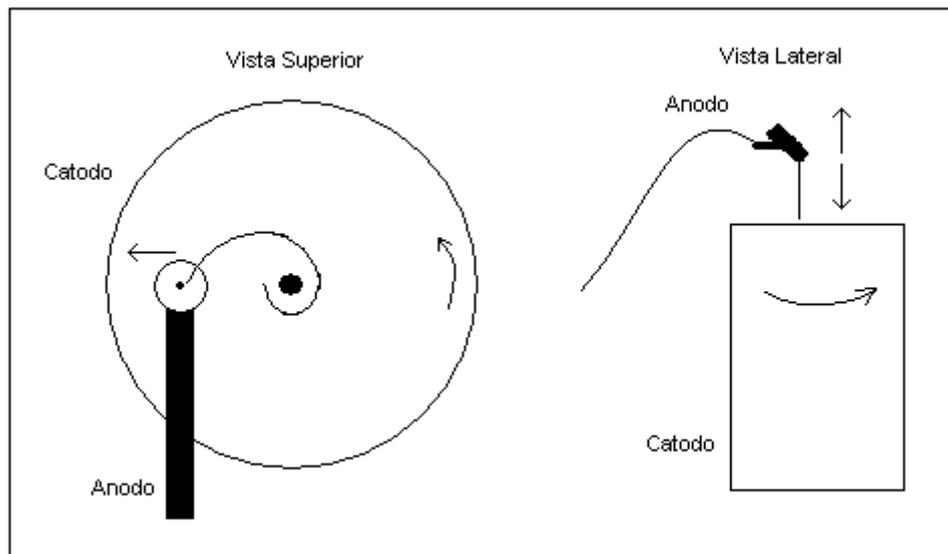
Como consecuencia de un trayecto inestable y la suspensión momentánea del plasma, la barra de carbón no se consume en la forma más adecuada, pues no todo el grafito es parte de la sublimación. Por ello el proceso antiguo

realizado en el LANOTEC, no estaba dando la máxima cantidad de nanotubos que se podrían obtener. Esto era un problema pues dificultaba hallar NTC en una observación por medio de un microscopio. Además, para realizar diferentes investigaciones, una mayor cantidad abriría las puertas a más opciones y diferentes pruebas. Por último un mayor rendimiento ahorraría costos de producción en ánodos de grafito y en la compra del gas.

1.2. Resumen de la solución seleccionada

Para poder simular los movimientos necesarios para la soldadura, se decidió utilizar tres motores: dos de ellos se encargaron de cubrir toda la superficie del cátodo y otro se utilizó para subir y bajar el ánodo conforme se fuera desgastando la barra delgada de grafito.

Para cubrir toda la superficie circular del cátodo se usó un motor para rotarlo mientras otro motor iba moviendo el ánodo desde el centro hacia fuera. Con estos dos movimientos se obtuvo una espiral en el cátodo, como se observa en la figura 1.3.



(Paint)

Figura 1.3 Movimientos necesarios

Luego, para tener una distancia constante en todo el recorrido, se usó el tercer motor para subir y bajar el ánodo, para que se consumiera a una misma

tasa en todo momento. Como señal de retroalimentación se adquirió un sensor de corriente constante para mantener la distancia en un mismo valor y el arco sin interrupciones. Para resolver el problema de la inhalación de nanotubos de carbono se ubicó un extractor para filtrar las partículas y que no fueran expulsadas a la atmósfera. Por último para brindarle aún más seguridad al usuario se adaptó el sistema para que todo pudiera ser controlado por computadora.

Capítulo 2: Meta y objetivos

En este capítulo se exponen las bases para medir el alcance del proyecto y el porcentaje de resolución del problema.

2.1. Meta

Aumentar el rendimiento en la producción de nanotubos de carbono con el método de descarga de arco eléctrico, para potenciar la investigación y disminuir los costos de operación, de una forma tal que sea segura para las personas que están manipulando constantemente el proceso de fabricación.

2.2. Objetivo general

Crear un proceso en el que sus resultados sean constantes en cuanto a consumo de materiales y aparición de nanotubos, de forma que la persona encargada no se vea expuesta a un ambiente peligroso.

Indicador: Gráfica de corrientes mínimas que no bajen de la necesaria para mantener el arco.

2.3. Objetivos específicos

a. Objetivos de hardware

- Mantener el arco eléctrico sin interrupciones durante el recorrido en espiral.

Indicador: En la gráfica de corrientes no debe aparecer ningún valor igual a cero amperios.

- Automatizar el movimiento del ánodo de grafito alrededor de la barra más gruesa para que realice un recorrido en espiral.

Indicador: Gráfico de las distancias contra tiempo adquiridas por la computadora.

b. Objetivos de software

- Crear una interfaz con una computadora personal para obtener los datos antes mencionados.

Indicador: Archivos del tipo txt que puedan usarse para tabular los resultados.

c. Objetivos de implementación

- Disminuir los efectos de las micropartículas suspendidas en el aire por medio de una cámara de succión.

Indicador: Mostrar qué relación existe antes de comenzar el proceso en comparación con la cantidad de nanotubos obtenidos en el filtro luego de realizado el procedimiento.

- Conocer una temperatura promedio del refrigerante.

Indicador: Establecer una temperatura promedio del agua que se haya dado durante el procedimiento.

Capítulo 3: Marco teórico

En este capítulo se presentan algunos conceptos básicos sobre nanotubos de carbono (NTC) con el fin de que el lector se encuentre más familiarizado con el tema y pueda comprender como funciona el método de la descarga de arco voltaico, así como otros conceptos que es recomendable conocer.

3.1. Descripción del sistema o proceso a mejorar:

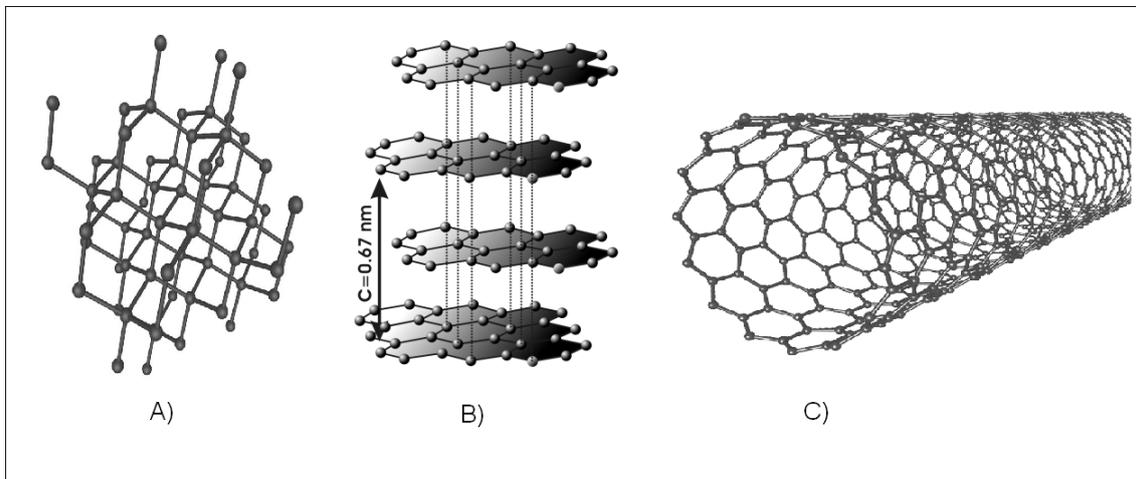
El proceso implementado en LANOTEC para la síntesis de NTC, es una variación del método de descarga de arco eléctrico mencionado. En este caso se utiliza una máquina de soldar, que cuenta con una conexión a un cilindro de gas, en el que se puede encontrar helio o argón (gases inertes cualquiera de ellos es viable para la creación del plasma). El electrodo de la máquina cuenta con una boquilla por donde se expulsa el gas a varios psi de presión (en el caso de LANOTEC a 40 psi de presión, ya que esta es la presión a la que el sistema obtiene su mejor rendimiento [2]). Gracias a esta condición de la soldadura, no se necesita una cámara de vacío, lo que convierte el proceso en algo más viable y sencillo de aplicar. El cátodo se sumerge en agua con hielo, porque se dice que el choque térmico que recibe el carbono aumenta la producción [3] y el agua hace que los nanotubos estén funcionalizados con grupos OH [4].

3.2. Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos

3.2.1. Definición de un nanotubo de carbono

Un nanotubo de carbono es otra forma en la que se han dispuesto los átomos de carbono; así por ejemplo el diamante se puede encontrar en una estructura cúbica o hexagonal, mientras que en el grafito sus átomos están ordenados en capas una encima de la otra con redes en forma de panal de abejas (Grafeno) [5]. Básicamente los nanotubos son estructuras cilíndricas donde los átomos de carbono están ordenados en forma hexagonal (figura 3.1).

Esta forma que toma, nace de una lámina de grafeno que se ha enrollado y cerrado en sus extremos [6].

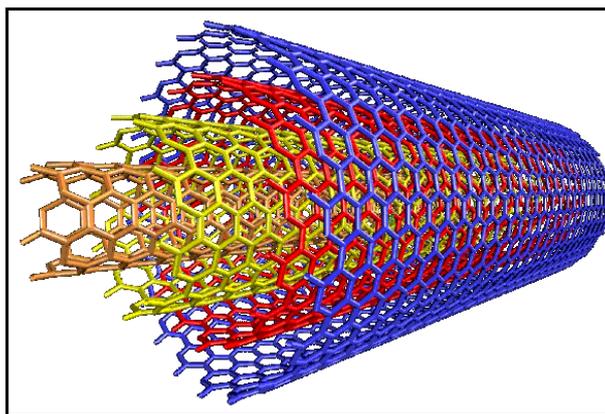


(Fuente: Wikicommons)

Figura 3.1 Diferentes formas que puede tomar el carbón.

3.2.2. Propiedades y aplicaciones

Antes de hablar de propiedades se debe tomar en cuenta que la forma anterior es una estructura muy básica y se pueden encontrar nanotubos con diversas formas. La estructura anterior es denominada de pared simple (SWNT por sus siglas en inglés) pues solo cuenta con una capa de grafito; cuando se encuentran láminas enrolladas dentro de otras láminas estas se denominan de pared múltiple [7] (Ver figura 3.2). Esto es importante porque un nanotubo de pared simple tiene propiedades superconductoras de hasta $4 \times 10^9 \text{ A/cm}^2$ [8] y si se modifica para obtener un cilindro cónico sus propiedades cambian a semiconductores, lo mismo pasa si el enrollamiento de la lamina (quiralidad) cambia [9], por otro lado los nanotubos de multi pared (MWNT Multi Wall Nano Tubes), se pueden usar como microsensores en la detección de gases y almacenamiento de estos [10].



(Fuente Topnews.in)

Figura 3.2 Estructura de un nanotubo multicapa

Entre sus principales propiedades se encuentran: es la fibra más resistente que se conoce actualmente, módulo elástico-longitudinal de entre 1 y 5 Terapascales [11], una fuerza tensil de 150 GPa superando al Kevlar de 3.8 GPa [12], una alta conductividad térmica de hasta 3500 W/mK, mientras que el cobre transmite a 385 W/mK [13].

Entre las aplicaciones que se están investigando para su utilización se encuentran: los súper condensadores, almacenamiento de hidrógeno, celdas solares, tejidos, cosméticos, transistores, memorias, pinturas. Como es un material aún en estudio la gama de posibilidades es tan amplia como la imaginación humana.

3.2.3. Métodos más utilizados para la creación de nanotubos

Ablación láser: Consiste en disparar un láser de alta intensidad contra un blanco de grafito en presencia de un gas inerte, todo esto contenido en un recipiente con sus paredes enfriadas para que los nanotubos se formen al entrar en contacto con la superficie a bajas temperaturas [14].

Descarga de arco: En un recipiente se introduce un gas inerte a baja presión, mientras que se hace circular una corriente de cientos de amperios con lo cual se crea plasma entre los electrodos que puede alcanzar hasta 3000 grados centígrados. A esta temperatura el grafito se sublima y se empiezan a

encontrar diferentes composiciones del carbono como los fullerenos y los nanotubos [15].

Deposición catalítica en fase de vapor (CVD): Este proceso empieza con una oblea de metal como oro cobalto o níquel, donde se producirá el crecimiento de los nanotubos. El sistema se lleva a altas temperaturas y se introduce un gas catalizador para ayudar en la descomposición de otro gas, que es el encargado de transportar el carbono. Este puede ser metano, etanol o monóxido de carbono. Una vez libres las moléculas de carbono, se empiezan a depositar en la oblea, creando así “estructuras” de nanotubos de carbono[16].

3.2.4. Efecto Hall

Cuando se aplica un campo magnético externo a un conductor por el que circula una corriente, los portadores de carga se agrupan en cierta dirección debido al efecto de un campo eléctrico perpendicular al campo magnético aplicado, esto es lo que se conoce como campo Hall [17].

3.2.5. Resistor regenerativo

Se refiere a un resistor que absorbe la energía de regeneración. Esta energía es la que se genera por causa de la operación del motor. Un servo drive utiliza circuitos internos para la absorción cuando el motor desacelera para prevenir que se produzca un sobrevoltaje [18].

Capítulo 4: Procedimiento metodológico

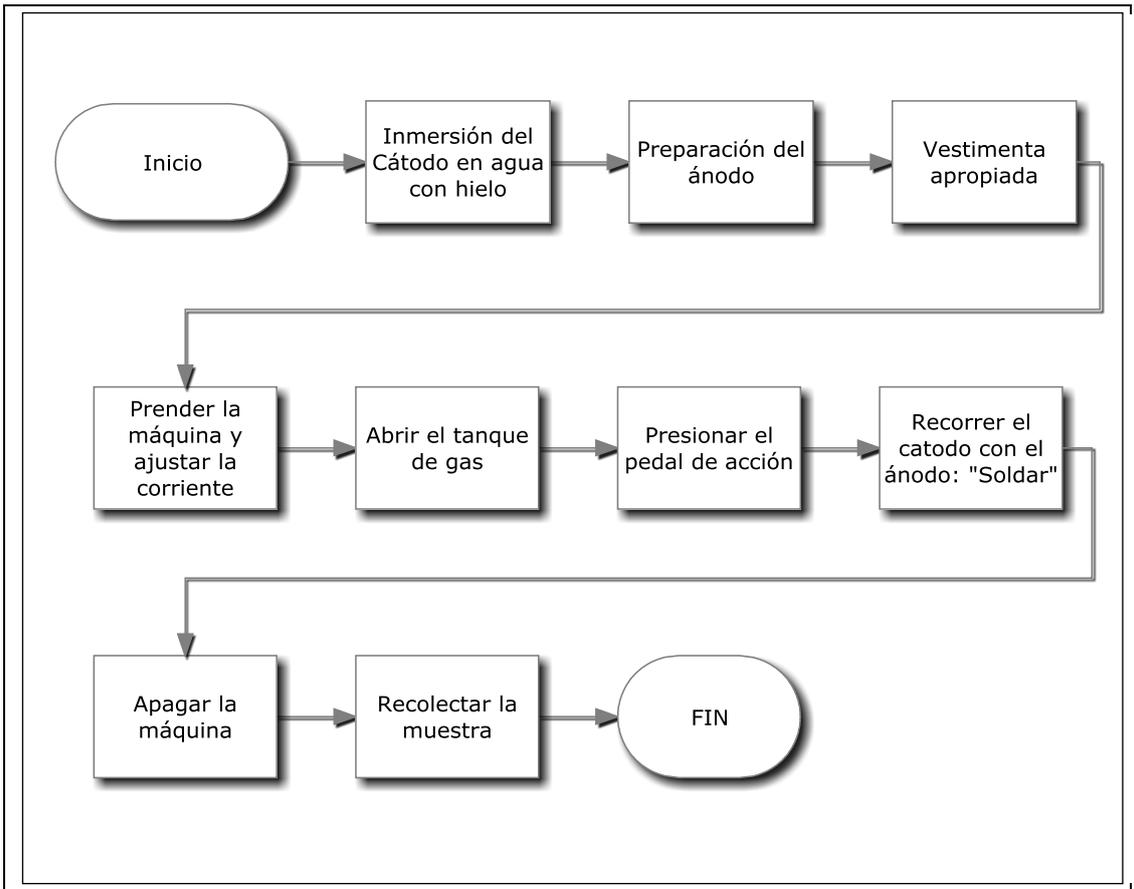
En este capítulo se expone la forma en que se llegó a la solución del problema, siguiendo las distintas etapas en el diseño ingenieril. Primero se explica el problema y lo que se conoce de este por medio de preguntas a las personas involucradas con el proceso en el LANOTEC y mediante consulta bibliográfica; luego se muestra como se usó esta información para establecer una solución; por último se evalúa esta solución para corregir aquello que no se adecuó a lo esperado.

4.1. Procedimiento para la descarga de arco eléctrico

En la figura 4.1 se muestra un diagrama de bloques de las etapas del proceso. Una vez inmerso el cátodo en el agua fría, la preparación del ánodo consiste en tomar una varilla larga y quebrarla para que su longitud no sea excesiva en la pistola de soldadura. Luego se calcula que aproximadamente 1cm sobresalga de la boquilla; este centímetro es el de “sacrificio”, pues es el que se va a consumir.

Luego de esto se deben vestir los guantes y el delantal de cuero, la mascarilla y el casco de soldador. Para que se produzca el plasma se pueden aplicar distintas intensidades de corriente. El usuario de la máquina tiene la capacidad de variar la corriente para comparar los resultados en el producto obtenido. Después de establecida la corriente el tanque de gas se abre y por medio de un manómetro se controla la presión a la que se quiere trabajar.

Un detalle importante es que la máquina de soldar aún encendida y con los dos electrodos en contacto no causa ningún efecto, pues como medida de seguridad la TIG cuenta con un pedal de acción para el momento en que se desea que haya un voltaje aplicado entre los electrodos. Al accionarse el pedal se expulsa el gas y la corriente se activa. Ya con esto se puede empezar a “soldar” sobre el cátodo y, cuando se gasta el centímetro del electrodo o la persona encargada lo crea pertinente, se suelta el pedal y se recolecta la muestra depositada sobre el cátodo.



(SmartDraw)

Figura 4.1 Etapas del proceso

4.1.1. Características clave del proceso actual

Dentro de las etapas anteriormente descritas se encuentran ciertos elementos que deben explicarse para entender el papel que desempeñan en el proceso. Estas son:

a. Presión del gas: El gas inerte utilizado es el que se transforma en plasma una vez ionizado por la corriente eléctrica. Lo que sucede es que si la presión del gas es muy baja, no va a producirse el plasma ni sublimarse el grafito, y si la presión es muy alta el sistema va a expulsar mucha energía lo que puede dañar la estructura de los nanotubos, aparte que a mayor presión se gasta más rápido el material por lo que se incurre en mayor gasto monetario.

Esas dos presiones influyen en la constancia del plasma. Es por eso que se debe encontrar un nivel óptimo de presión.

b. Tiempo de operación: El tiempo de operación varía de 2 a 5 minutos dependiendo del cansancio del operador [19], este tiempo significa que el desgaste del electrodo no es constante durante la soldadura.

c. Enfriamiento: Al enfriar el cátodo con agua con hielo suceden dos cosas: los nanotubos son funcionalizados con grupos hidroxilo [4], y el rendimiento de los nanotubos se ve incrementado. Además permite que el proceso se pueda repetir sin que el cátodo alcance altas temperaturas.

d. Distancia constante: Mantener una misma distancia entre electrodos, a pesar del desgaste del ánodo, es primordial para que el plasma sea constante durante todo el procedimiento. Un plasma constante durante la descarga de arco eléctrico aumenta la aparición de nanotubos de carbono [20].

e. Polaridad de los electrodos: La máquina de soldar permite cambiar la polaridad de los electrodos cuando se utiliza C.C. El electrodo que se define como positivo es el que se conoce como de “sacrificio”, pues es el que se consume. También existe la opción de C.A. pero en este caso se desgastan ambos electrodos y esto no es conveniente. Existe una tercera posibilidad que trabaja como C.C. pero con una componente de alta frecuencia que ayuda a crear y mantener el arco eléctrico [21].

f. Cantidad de nanotubos: La cantidad de nanotubos es aún difícil de cuantificar, no se puede determinar con exactitud un número y menos aún si existen muchas impurezas en la muestra. Se puede no obstante obtener un peso y pureza aproximados de la muestra, lo que ayuda a hacer una comparación en cuanto a procesos.

4.1.2. Efectos nocivos

Existen diferentes aspectos del proceso que tienen una influencia negativa en la salud de las personas, estas son:

Riesgo de electrocución: La persona puede experimentar el paso de corriente a través de su cuerpo a causa del proceso de soldadura, en la que se involucran altos voltajes y corrientes. Al mismo tiempo se encuentra el agua con hielo, que puede facilitar el paso de la corriente si la persona entra en contacto con ella.

Radiación electromagnética: El proceso de soldadura expulsa radiación ultravioleta conocida por ocasionar daños en la piel, afecta la vista produciendo ceguera después de una exposición prolongada e incluso puede afectar el ADN lo que conlleva a la aparición de cáncer [22]. La luz visible es muy intensa, lo que hace imposible ver el proceso sin un filtro para soldadura. El calor que se genera también puede ocasionar quemaduras y hacer más difícil la correcta manipulación del electrodo para que la distancia se mantenga en el rango requerido.

Gases y partículas: Entre los subproductos que se expulsan se encuentra el ozono, el dióxido de nitrógeno y monóxido de carbono. Estos gases se producen del contacto del calor y la energía radiante con el aire [22]. Y son conocidos por ser dañinos para la salud y afectar las vías respiratorias. Otros subproductos son las micro y nanopartículas y nanotubos de carbón que no se depositan en el cátodo sino que terminan suspendidos en el aire. Los efectos sobre la salud de estos residuos aún no son completamente conocidos, pero se sabe que han tenido reacciones toxicológicas en los pulmones [23].

4.2. Obtención y análisis de información

En una primera etapa se consiguió información básica a través de correos electrónicos con el señor José Roberto Vega Baudrit, director de LANOTEC, donde se detallaba que el tiempo que duraba el proceso de producción era de

2 a 5 minutos. Este tiempo variaba dependiendo del cansancio de la persona que sostenía el electrodo. Esta información da lugar a un primer problema y es que no hay constancia entre diferentes ejecuciones, tanto en el tiempo como en el arco eléctrico.

En estos correos se explica que si el plasma no es constante e influye en la cantidad de nanotubos que se pueden observar con un microscopio SEM, TEM o AFM.

A partir de diferentes entrevistas con Sergio Ramírez se obtuvo información más específica sobre las diferentes partes que se involucran en el sistema. Así, por ejemplo, el precio de los electrodos de grafito es barato, aproximadamente de unos 30 a 40 dólares por paquete con 12 de ellos. Pero por otra parte el cátodo de grafito es una estructura bastante particular que no se encuentra en cualquier comercio. De hecho el cátodo que posee LANOTEC fue donado por la científica Jeannette Benavides.

El proceso de creación de nanotubos es una adaptación del procedimiento estándar de arco voltaico. Este proceso es la aplicación de la patente de Benavides [4], que el laboratorio tiene permiso de utilizar.

Una de las opciones con las que cuenta la máquina (Miller Syncrowave 250DX) es la de trabajar con una componente de alta frecuencia, la cual ayuda a que se forme el arco cuando los dos electrodos se encontraban cerca. La escogencia de alta frecuencia se puede establecer para que solo se aplique al principio del proceso o de forma continua. Existen dos alternativas que se usan en procesos de soldadura para establecer la chispa inicial. Una de ellas era raspar un poco la superficie del cátodo con el ánodo para que se produzca la chispa y la otra poner en contacto directo los dos electrodos, esperar unos segundos y luego ir alejando poco a poco el ánodo. La componente de alta frecuencia causó graves problemas que se mencionarán más adelante. Por esa razón se tuvo que usar el método de contacto y luego alejar.

Al ser una máquina TIG (Tungstene Inert Gas) esta usa la misma boquilla del electrodo para expulsar el gas. El gas es necesario para que se forme el plasma, el plasma es el encargado de sublimar el grafito. Por otra parte el gas alrededor del punto de soldadura ayuda a desplazar el oxígeno y nitrógeno del aire, los cuales son causantes de la oxidación en un proceso de soldadura. Según la patente del proceso de nanotubos el gas a utilizarse es helio, pero por investigación del propio laboratorio se concluyó que el argón era más viable pues aumentaba la productividad de NTC y era más barato que el Helio [2].

Otro de los aspectos que aumenta la productividad es el agua con hielo en la que se debe encontrar el cátodo. El agua con hielo provoca que el grafito encuentre un choque térmico después de sublimado. Se determinó por medio de las entrevistas que el agua después del procedimiento se volvía tibia, pero no se sabía cómo cambiaba la temperatura durante todo el lapso. Basado en esa información se determinó que era importante llevar un registro de la actividad de la temperatura del agua.

Recabando más datos se averiguó que el electrodo realmente se desgastaba poco durante el recorrido: de unos milímetros a un centímetro dependiendo de la corriente utilizada. Dado que el material recolectado era tan poco se hacía difícil dar un dato claro de cuantos nanotubos se tienen por gramo.

4.3. Evaluación de alternativas y síntesis de la solución.

4.3.1. Evaluación de las alternativas para la solución.

Existen diferentes aspectos que se debían tomar en cuenta a la hora de tomar decisiones para resolver el problema. Cada uno de esos aspectos se resume en las siguientes tablas.

Un primer impedimento era que no existía una estructura física en la que se pudiera montar los artefactos para manipular el movimiento de manera más

fina. Por esa razón se debía escoger la forma de la armazón principal (ver tabla 4.1).

Tabla 4.1 Tipos de configuraciones posibles para montar los motores

Descripción	Pros	Contras	Necesidades Técnicas
Brazo robótico de 6 ejes	Alto grado de movilidad Soportan condiciones extremas	Precios desde \$6,000 para arriba. Mayor complejidad	Resistir las condiciones de soldadura. Rango de movimiento suficiente para cubrir el cátodo. Movimiento fluido que no afecte el plasma.
Robot cartesiano XYZ	Precio moderado de \$1,500	Menor solidez. Equipo delicado para exponerlo a soldadura.	
Partes mecánicas hechas a mano	Posibilidad de personalizar el diseño y el movimiento Presupuesto más flexible dependiendo de los materiales	Consumo de tiempo Falta de experiencia	

Una vez lista la armazón principal el siguiente paso era la escogencia de los motores. En la tabla 4.2 se presentan las características principales de dos tipos motores utilizados generalmente en la automatización.

Tabla 4.2 Tipos de motores que se podían adaptar al sistema

Descripción	Pros	Contras	Necesidades Técnicas
Motores CA	Mayor torque Mayor precisión debido al encoder	Mayor cantidad de señales Precio más alto	Dos movimientos de alta precisión Alto torque Retroalimentar la posición
Motores Paso a Paso	Facilidad de manipulación Costo más bajo	Movimiento más brusco Menor fuerza	

El siguiente paso consistía en evaluar las opciones de medición de la distancia entre electrodos, para mantenerlos a una separación constante conforme se desgastaba el ánodo (ver tabla 4.3).

Tabla 4.3 Diferentes opciones de sensores para la medición de la altura

Descripción	Pros	Contras	Necesidades Técnicas
Sensor de ultrasonido	Se podía ubicar lejos del calor	La altura cambia	Resistir alta intensidad lumínica y calórica Rango de no más de 5 milímetros
Sensor de CC	Medición indirecta (No se expone a condiciones extremas) Aislamiento entre la parte digital y la de potencia	Medición indirecta (No se controla la altura)	
Resistencia shunt	Barata Sencilla de utilizar	No existe aislamiento Se necesitaba abrir el circuito de soldadura en algún punto	

Luego de comparar los motores se debía escoger el tipo de controlador para el control y monitoreo de los sensores y el movimiento de los motores (ver tabla 4.4).

Tabla 4.4 Posibles controladores para los motores.

Controlador	Pros	Contras	Necesidades Técnicas
PIC	Ya conocido y utilizado Barato Flexibilidad en las señales	Nivel de programación más bajo	Comunicación con la computadora Manejar todas las señales necesarias
PLC	Muy utilizado en la industria Solidez en el funcionamiento	Desconocido Precio considerable	Compatibilidad con los servoamplificadores

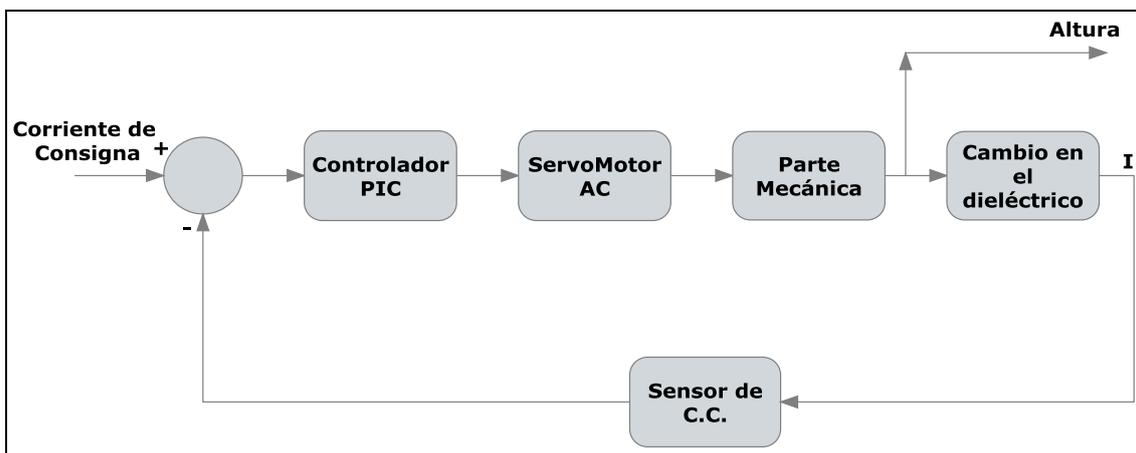
Por último se comparan diferentes formas de la extracción de humos que en algún momento se consideraron como posibles (ver tabla 4.5).

Tabla 4.5 Opciones para la extracción de los humos

Descripción	Pros	Contras	Necesidades Técnicas
Aspiradora comercial	Barata	Podía influir en el flujo de gas No están diseñadas para este tipo de trabajo	Potencia de succión variable
Extractor de humos de soldadura	Caro, desde \$2000	Puede afectar el de protección si no se adecua a las características	
Ventilador adaptado	Bajo costo No influye en el gas Adaptabilidad del filtro	No conduce a un compartimento final	

4.3.2. Síntesis de la solución.

Después de estudiar las opciones para la solución, se plasmó un bosquejo general de la solución, tal como se muestra en la figura 4.2. Aquí, ya se incluyen las distintas opciones escogidas.



(SmartDraw)

Figura 4.2 Representación modular del sistema

Gracias al aporte del profesor Fernando Villalta con el abastecimiento de equipo, se optó por la parte mecánica hecha a mano, pues el profesor no solo contribuyó con material y piezas sino con mano de obra para la construcción de la máquina. Los servomotores también fueron donados y se escogieron basados en la solidez que estos representan. Los servomotores C.A. escogidos fueron: SGDM-04ADA del fabricante Yaskawa, y el M-2330/4000 de Teknic.

Dado que no era necesario que la rotación del cátodo no fuera tan precisa, se escogió un motor a pasos para ese movimiento.

Por otro lado, como se conocía la forma de trabajo del microcontrolador y para asegurar la compatibilidad entre los servoamplificadores y los controladores se escogieron los microcontroladores PIC18F4550. Además se podía utilizar para obtener lecturas de la temperatura y del sensor de retroalimentación, y usar su memoria flash para recabar esa información que más adelante sería enviada a la computadora por puerto USB.

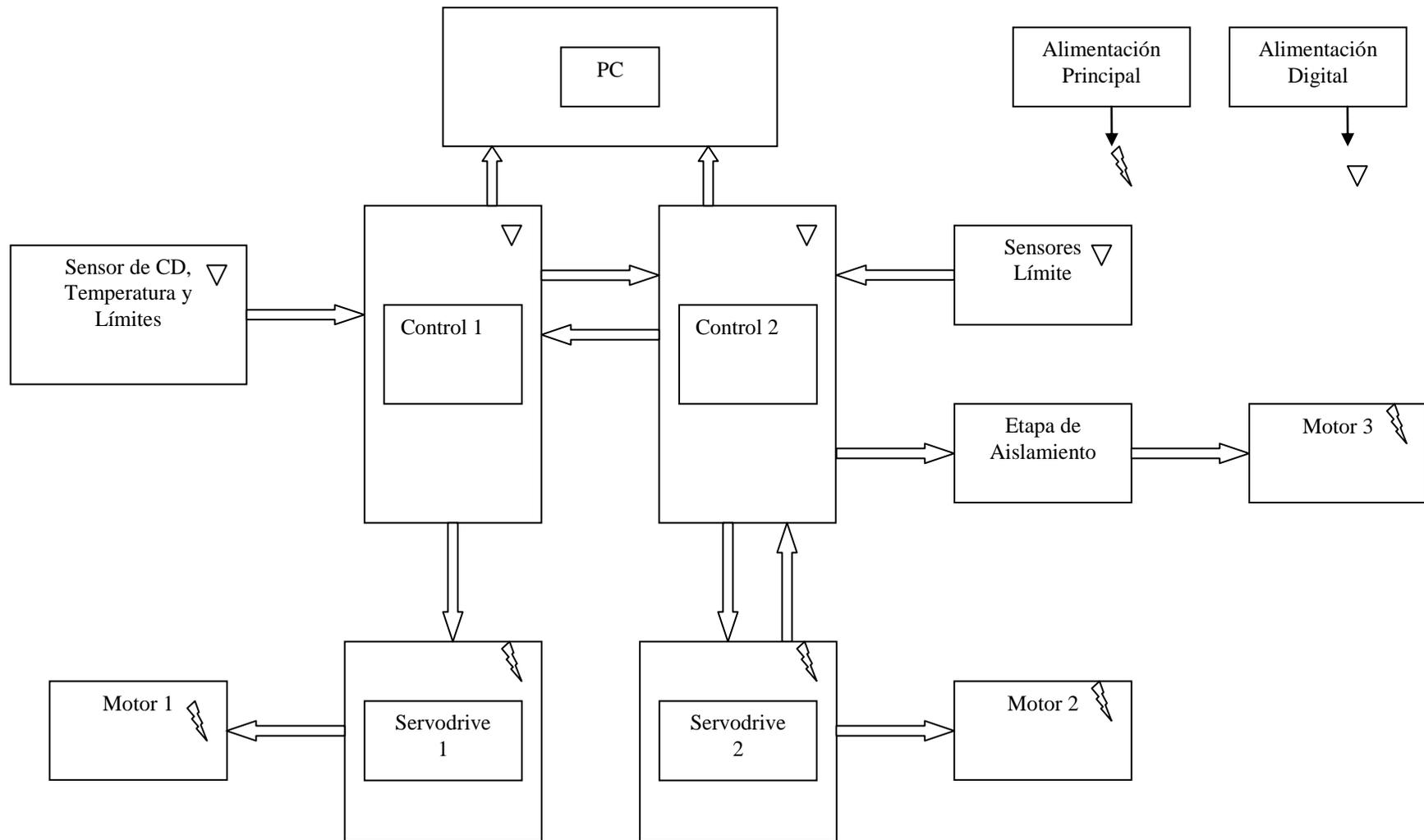
En cuanto al sensor, se escogió el de C.C., ya que era el que mejor se podía adaptar de una forma segura y aislada, sin que fuera afectado por la luz y el calor. Estas condiciones extremas justificaron utilizar una aproximación indirecta al problema de sensado. Por eso, a pesar de ser una medición indirecta, se eligió. La hipótesis era que la altura del dieléctrico podía modelarse como una resistencia variable, y por tanto así iba a cambiar la corriente dependiendo de la altura.

La temperatura que supuestamente alcanzaba el refrigerante permitía que el sensor de temperatura no tuviera que ser muy especializado ni que soportara altos rangos. Por esa razón se optó por un LM35, el cual puede operar en el rango de los 2 grados centígrados hasta los 150 grados en una configuración sencilla donde solo se debía aplicar una fuente de 4 a 20 voltios.

La aspiración se decidió hacer por medio de un ventilador, pues era de muy bajo costo en comparación con las otras dos opciones y debía ser muy suave. En caso de no haber funcionado, desechar el producto no hubiera significado una gran pérdida de dinero.

4.4. Implementación de la solución.

La implementación que se llevó a cabo se explica a manera de bloques en la figura 4.3. En ella se detalla la funcionalidad de cada bloque, y el esquema de conexionado entre las distintas partes del sistema.



(Microsoft Word)

Figura 4.3 Diagrama de primer nivel de las partes del sistema.

Controladores

Se utilizaron dos microcontroladores pues la complejidad del sistema implicaba trabajar muchas interrupciones, guardar datos y manejar tres motores que trabajaran al mismo tiempo. Los dos controladores tienen rutinas de programación diferentes, pero están sincronizados entre sí.

Motores

El PIC I se encarga de enviar las señales respectivas para manejar el servoamplificador marca Yaskawa, que a su vez maneja el motor que mueve la plataforma para subir y bajar el ánodo.

El PIC II está al mando de las señales del servoamplificador de Teknic. Este servo maneja el motor responsable del movimiento radial del ánodo, desde el centro hacia fuera. Este es el único motor que informa la posición al micro. El segundo microcontrolador también está a cargo de las señales para coordinar el giro del motor a pasos, que rota el cátodo. Para este motor se debe utilizar una etapa de aislamiento y otra de potencia para alimentarlo.

Sensores

Cada uno de los PIC utilizan dos sensores infrarrojo limitadores de carrera. El primer PIC los utiliza para determinar límites superior e inferior de la plataforma y el segundo microcontrolador para límites horizontales en la parte interna y externa del cátodo. El PIC I adquiere datos de la temperatura del agua y del sensor de corriente para la correcta manipulación de la plataforma.

Computadora

Por último ambos controladores contaban con un puerto USB por el que se comunican con una computadora para enviarle los datos guardados durante el proceso. El PIC I también puede arrancar el proceso por medio de una orden de la computadora.

Capítulo 5: Descripción detallada de la solución

En este capítulo se exponen de forma más detallada los diferentes módulos que componen el sistema, tanto la parte de hardware como de software. En el segmento físico se explicarán las unidades a partir de un diagrama general, y en el aspecto de software se describe la programación de los dos microcontroladores y la interfaz de usuario.

5.1 Descripción del hardware

Para tener un entendimiento más profundo del sistema se presentan los circuitos y las conexiones más importantes.

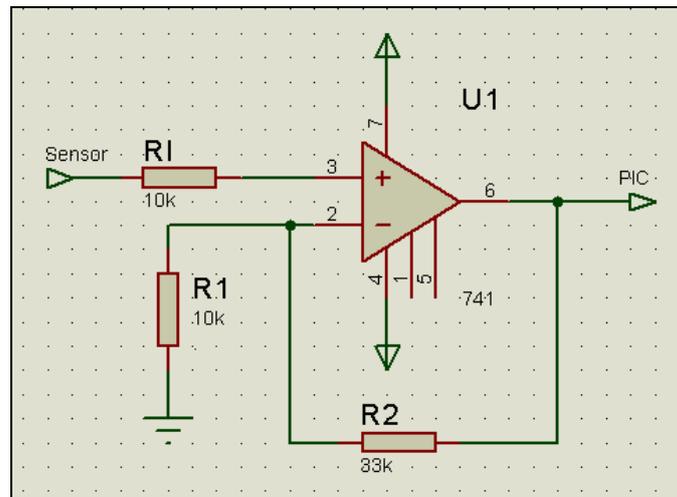
5.1.1. Sensores

Limitadores de carrera:

Los límites del movimiento se establecieron por dos tipos de interruptores ópticos, el EE-SX670A y el EE-SX671A. En la figura 5.1 se observa como se comportaban las señales al darse una interrupción del haz, también la configuración interna de los sensores infrarrojos.

Se calculó una $R_L=1.5k\Omega$ para limitar la corriente del transistor y la corriente de salida del PIC. El voltaje utilizado es el de salida del PIC de 5V. El modo empleado fue “*Dark-On*”.

El circuito y sus componentes se muestra en la figura 5.3.



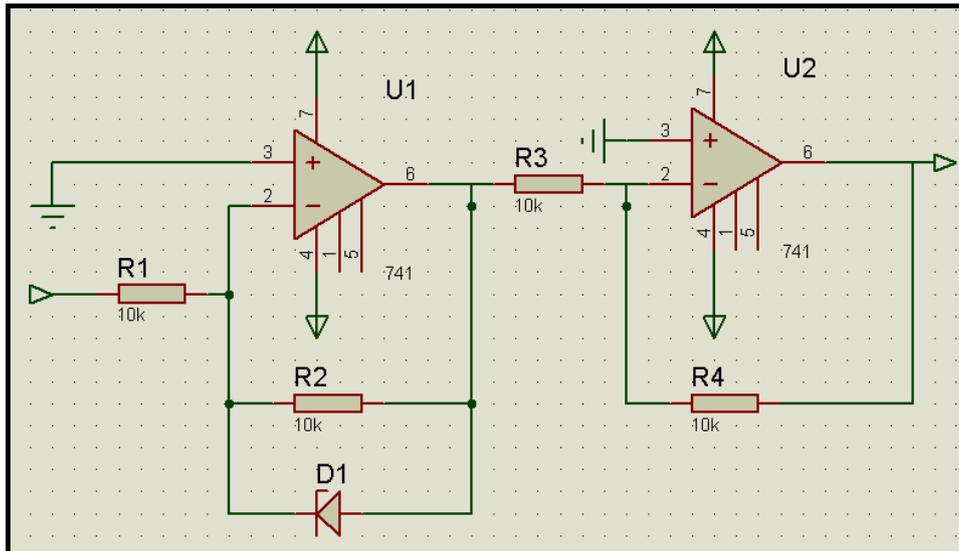
(Proteus)

Figura 5.3 Amplificador no inversor

Sensor de corriente continua:

La señal del sensor de corriente continua (H970LCA) se acondicionó para evitar que superara los 5 voltios y dañara el micro.

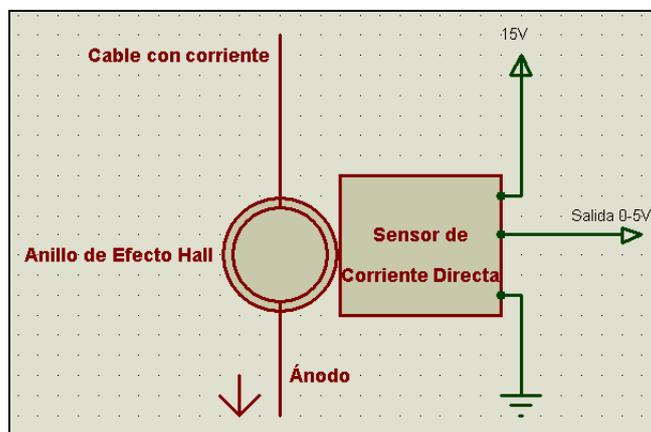
Para ello se utilizó un amplificador operacional en modo recortador seguidor. El recortador invirtió la señal por lo que fue necesario pasarlo por otro seguidor inversor, la figura 5.4 muestra el circuito con detalle. El diodo zener coloca un límite al voltaje máximo de salida del amplificador. En este caso el voltaje zener escogido fue de 5.1V por ser el límite de tensión a la entrada del ADC.



(Proteus)

Figura 5.4 Circuito para la conexión del sensor de CD
 Los OpAmp están conectados en modo seguidor.
 El zener provee de limitación de tensión a 5.1V.

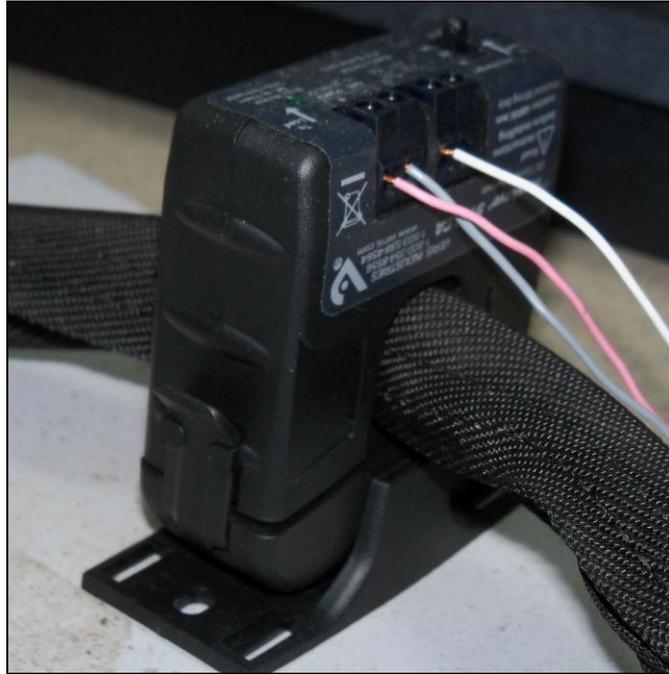
La forma de conexión del sensor de corriente constante dependía únicamente de la alimentación que podía ser de 15 a 24 voltios C.A. o C.C. y su salida se podía conectar al controlador por su terminal de 0 a 5 voltios. Su conexión se muestra en la figura 5.5.



(Proteus)

Figura 5.5 Conexión del sensor con el cable de poder

En la figura 5.6 se muestra la conexión real del sensor de C.C. Nótese como encierra el cable conductor del electrodo sin realizar una conexión eléctrica.



(GIMP)

Figura 5.6 Conexión física del sensor H970LCA

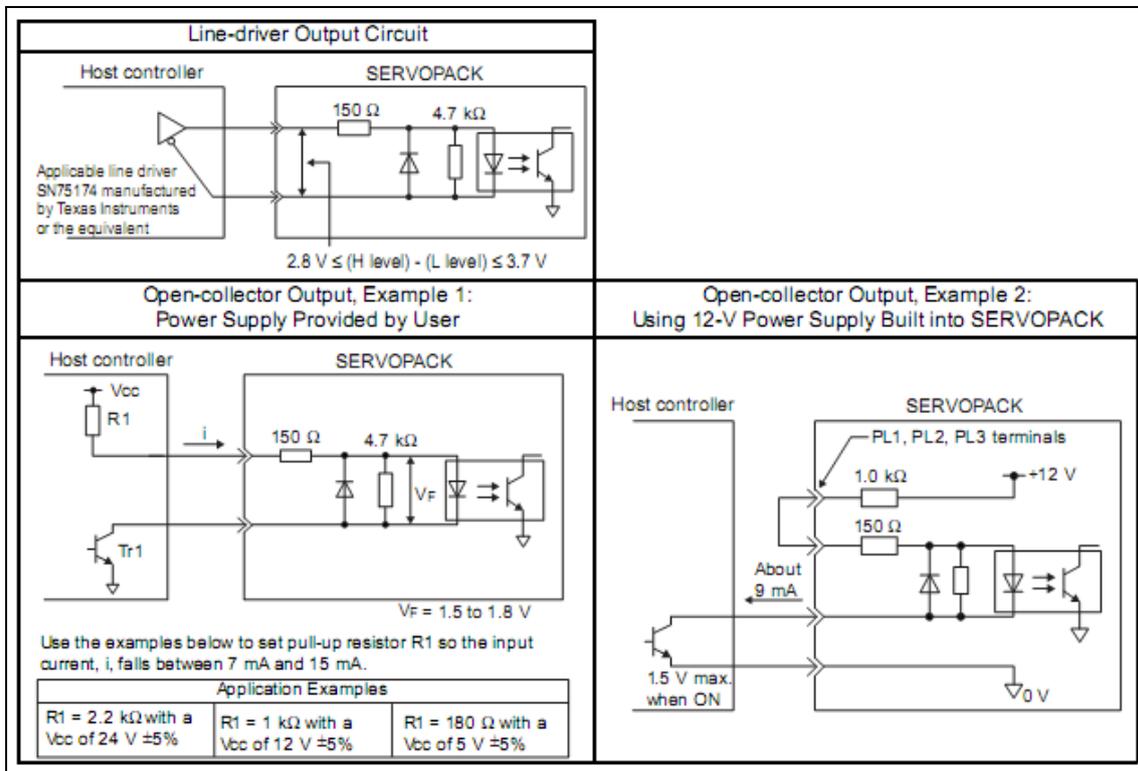
5.1.2. Aislamiento y conexiones de los motores

Servoamplificador SGDM-04ADA Yaskawa:

Todo el funcionamiento y la forma de manipular el servoamplificador no pueden ser detallados en este informe. Ante alguna duda más específica se debe recurrir a los manuales de usuario que se mencionan en la bibliografía. En este apartado se explica la forma de conexión entre los servoamplificadores y el controlador.

En la figura 5.7 se muestran las tres configuraciones posibles para conectar las entradas de los servos con el controlador. La primera opción tenía el inconveniente que en el mercado local no se pudo hallar el integrado que recomienda el fabricante, el SN75175. La tercera opción era sencilla de aplicar pero en el circuito ya no existía un aislamiento eléctrico correcto porque la fuente de 12 voltios del servo estaba conectada al controlador. Por eso la segunda configuración fue la elegida. Se escogió utilizar una resistencia de 221Ω para que la corriente de operación se mantuviera dentro del rango pedido

por el fabricante, esto es en $11,6\text{ mA}$ y el transistor se alimentó con la misma fuente de 5 voltios del PIC.

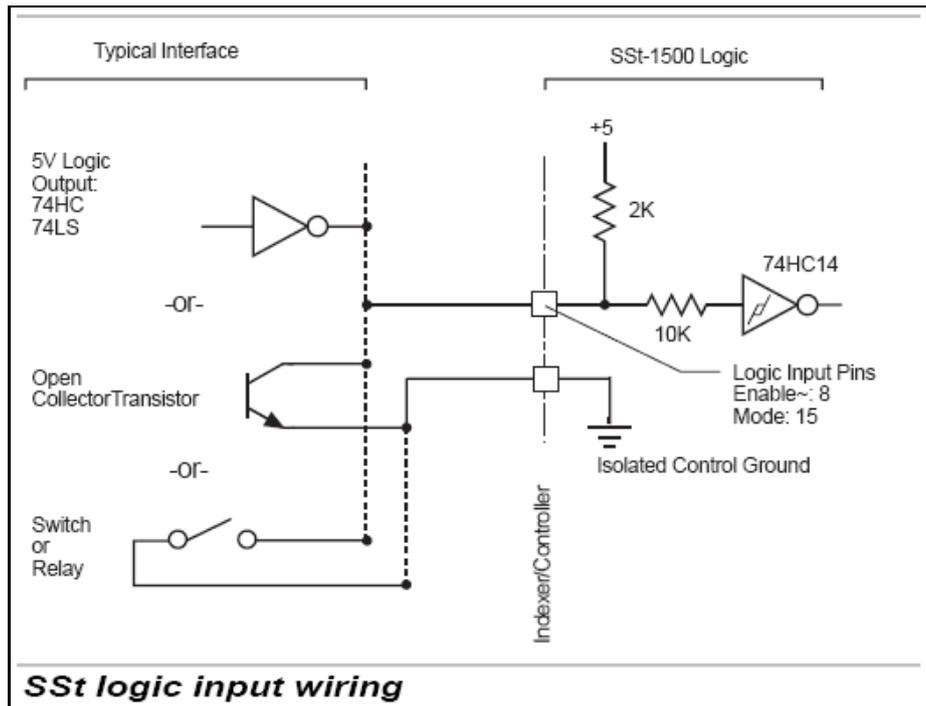


(Fuente Teknic)

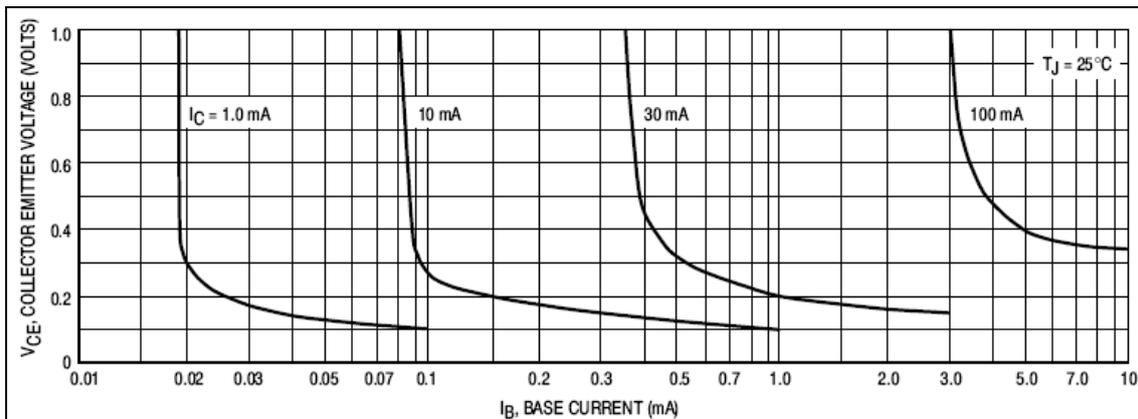
Figura 5.7 Posibles conexiones entre el servo amplificador y el control.

Servoamplificador M-2330/4000 Teknic:

Las salidas del servo se conectaron al segundo controlador utilizando la configuración de colector abierto mostrado en la figura 5.8. En esa configuración el transistor se polariza para trabajar como interruptor. Para lograr esa polarización con el transistor 2n3904, se recurrió a la figura 5.9 en la que detalla la corriente que se necesita en la base. Se calculó que con una resistencia de $1\text{ k}\Omega$, entre el PIC y la base del transistor, daría una corriente suficiente para saturarlo.

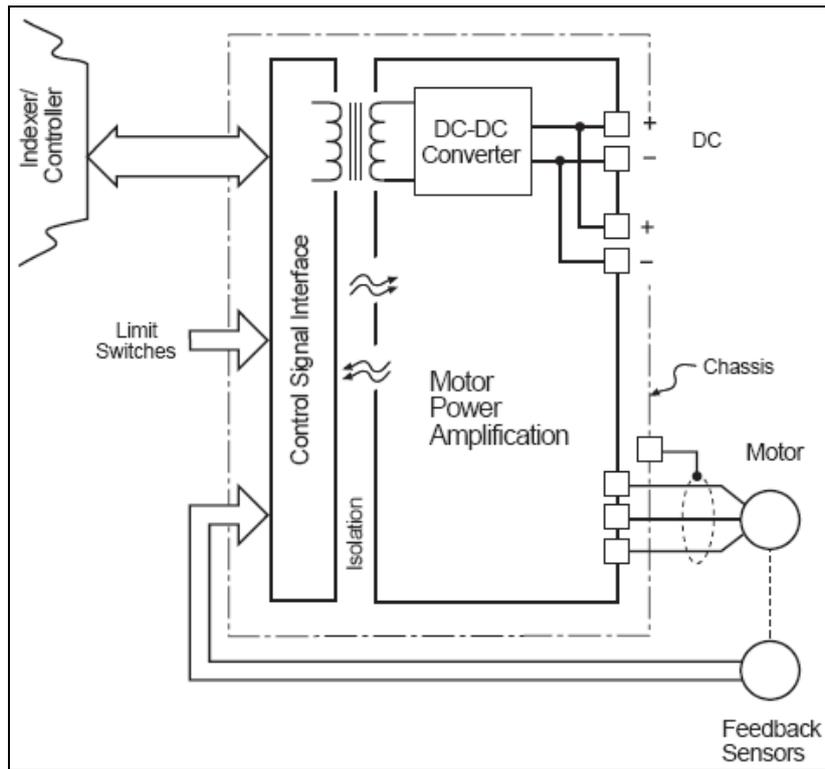


(Fuente Teknic)
Figura 5.8 Conexiones del servo drive 2 con la etapa de control



(Fuente On Semiconductor)
Figura 5.9 Voltaje colector-emisor versus corriente de base.

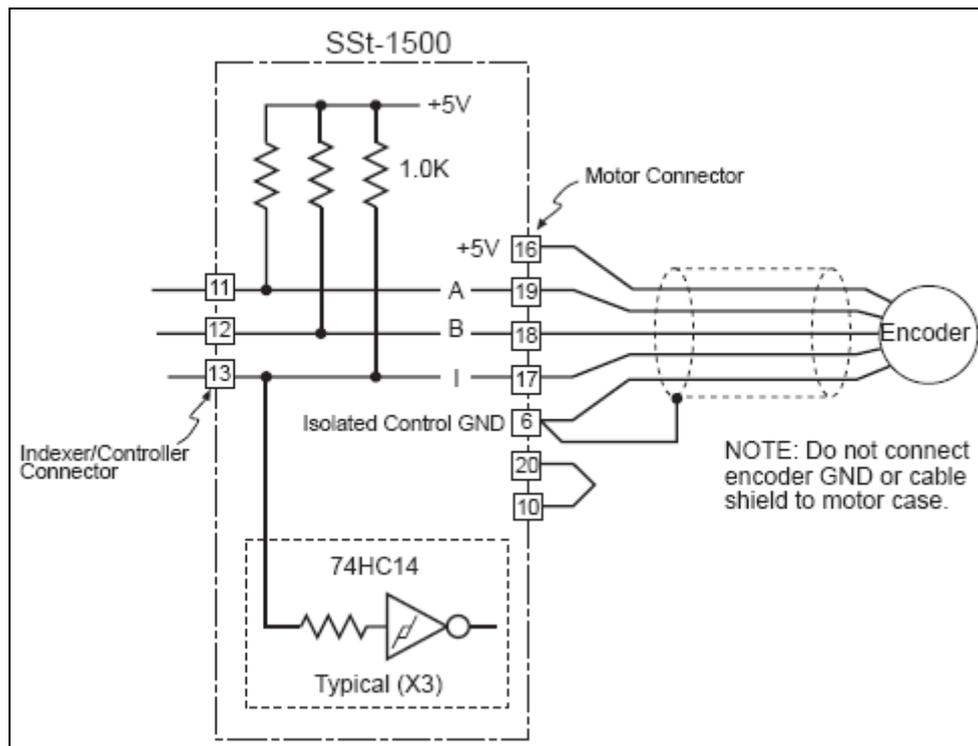
Lo anterior se hizo para todas las conexiones desde el PIC hacia el servo. Las conexiones desde el servo hacia el PIC se hicieron alambrando directamente. Esto se hizo porque el servo contaba con un aislamiento entre el control y la parte de potencia como lo señala el mismo fabricante en la figura 5.10.



(Teknic)

Figura 5.10 Aislamiento de las etapas de potencia y control dentro del servo

La señal de salida de la fase A del encoder del servo (ver figura 5.11), se conectó al segundo controlador con el fin de conocer la posición axial, pues esta fase enviaba un pulso por cada fracción del giro del motor. Un conteo de mil pulsos de esta señal representaban la vuelta completa del eje.

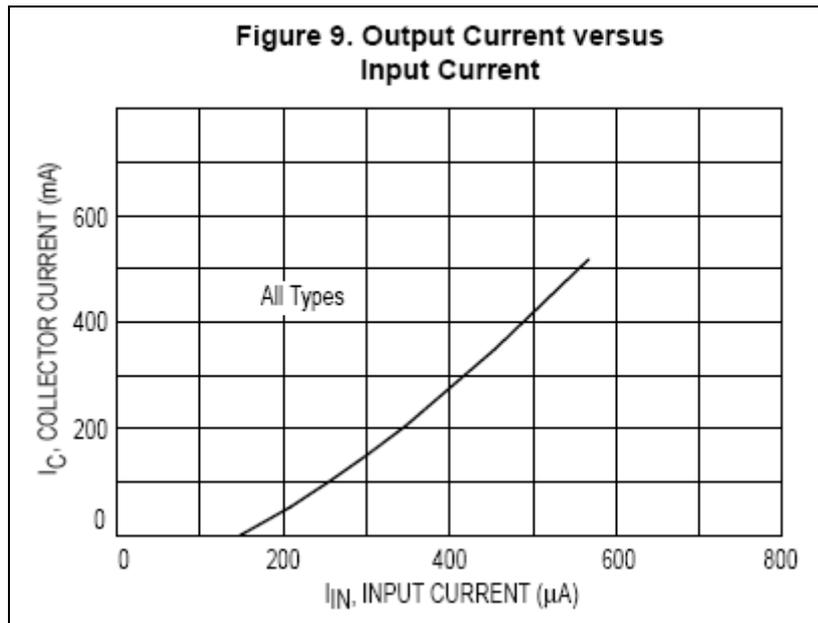


(Fuente Teknic)

Figura 5.11 Diagrama de conexión interna de las salidas

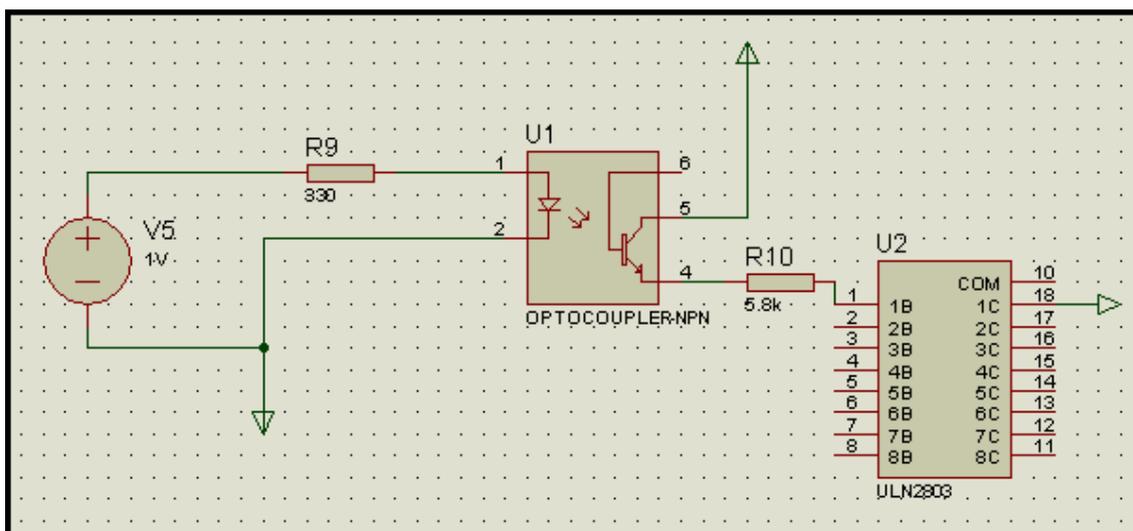
Aislamiento del motor a pasos:

Para transmitir las señales entre el PIC y el driver del motor a pasos se usaron 4 optoacopladores 4N25. La corriente de colector de los transistores Darlington en saturación dependían exclusivamente del bobinado del motor. Para llevar el transistor a saturación se hizo uso de la curva graficada en la figura 5.12, de donde se calcularon las resistencias para activar el optoacoplador de manera que también pudiera saturar el transistor Darlington. El valor de los componentes y los puntos de operación se muestran en la tabla 5.1:



(Fuente Motorola)

Figura 5.12 Corriente de entrada vs. corriente de salida



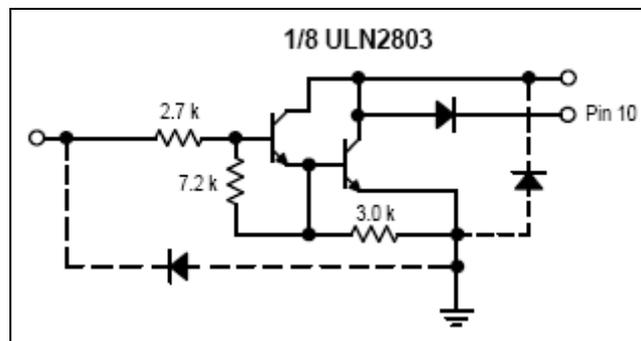
(Proteus)

Figura 5.13 Conexión de los optoacopladores

Tabla 5.1 Valores de los componentes y puntos de operación del circuito de aislamiento y el motor a pasos

Componente	Especificaciones del fabricante	Punto de operación	Componente Clave	Valor
ULN2803	$I_{Bsat} \text{Darlington} = 600 \mu A$ $V_{Bmax} = 30V$ $I_{Cmax} = 500mA$	1mA 12V 300mA	R10	5.8 k Ω
4N25	$I_{LED} \text{ max} = 60mA$	15mA $I_{Copto} = I_B \text{ Darl.}$	R9	330 Ω

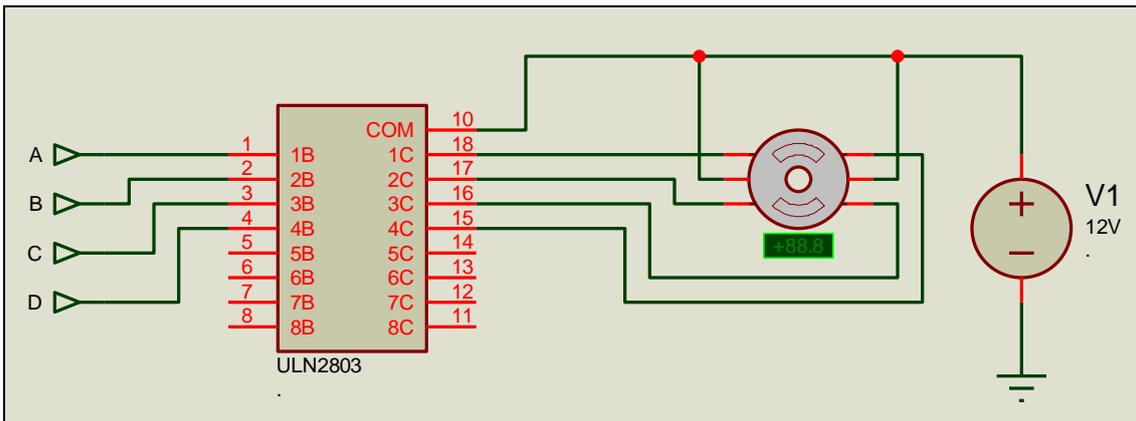
Para comprobar que la resistencia era correcta para el buen funcionamiento del motor se hizo una simulación (Véase figura 5.13) con el circuito interno de uno de los arreglos según la figura 5.14 dada en la hoja de datos del fabricante. En esta también se puede apreciar un diodo de rodamiento libre en el pin 10, que es el común para todos los cables del motor a pasos.



(Fuente Motorola)

Figura 5.14 Configuración interna de uno de los arreglos del ULN2803

En la figura 5.15 se presenta la forma de conectar los seis cables del motor a pasos con el integrado ULN2803. Las entradas se omiten para simplificar el diagrama pero se refieren a los cuatro optoacopladores que a su vez tienen las entradas conectadas al PIC.

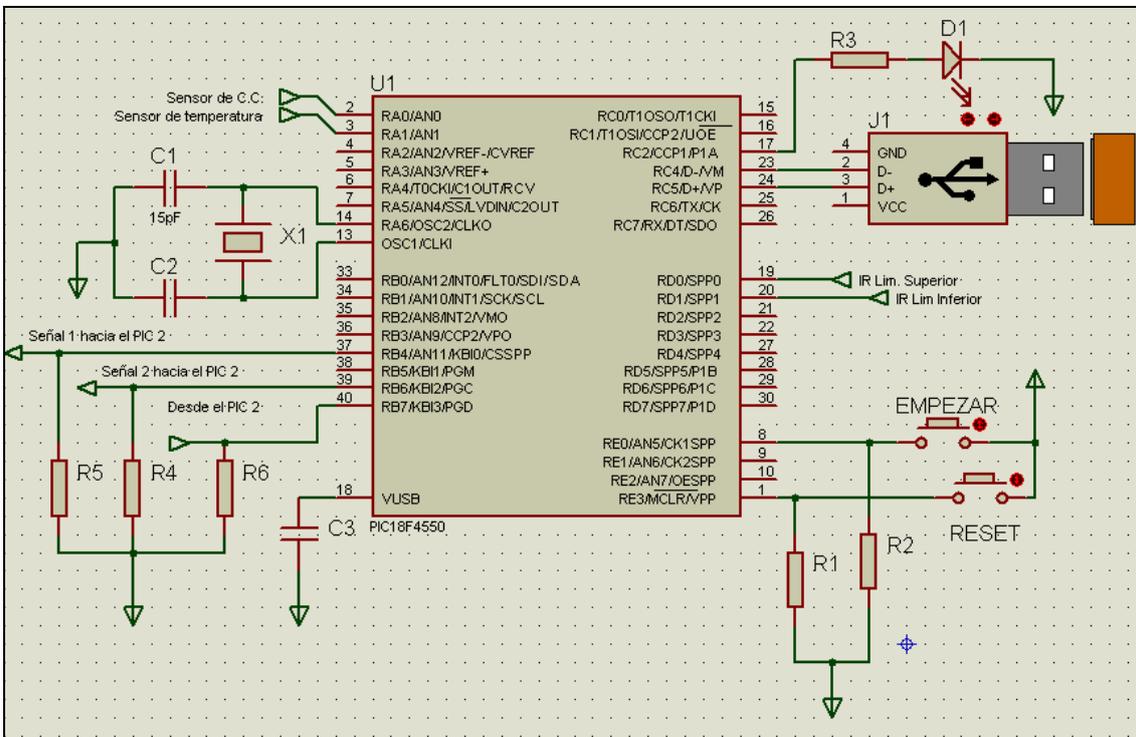


(Proteus)

Figura 5.15 Conexión del ULN2803 con el motor y la fuente

5.1.3. Conexiones de los microcontroladores PIC

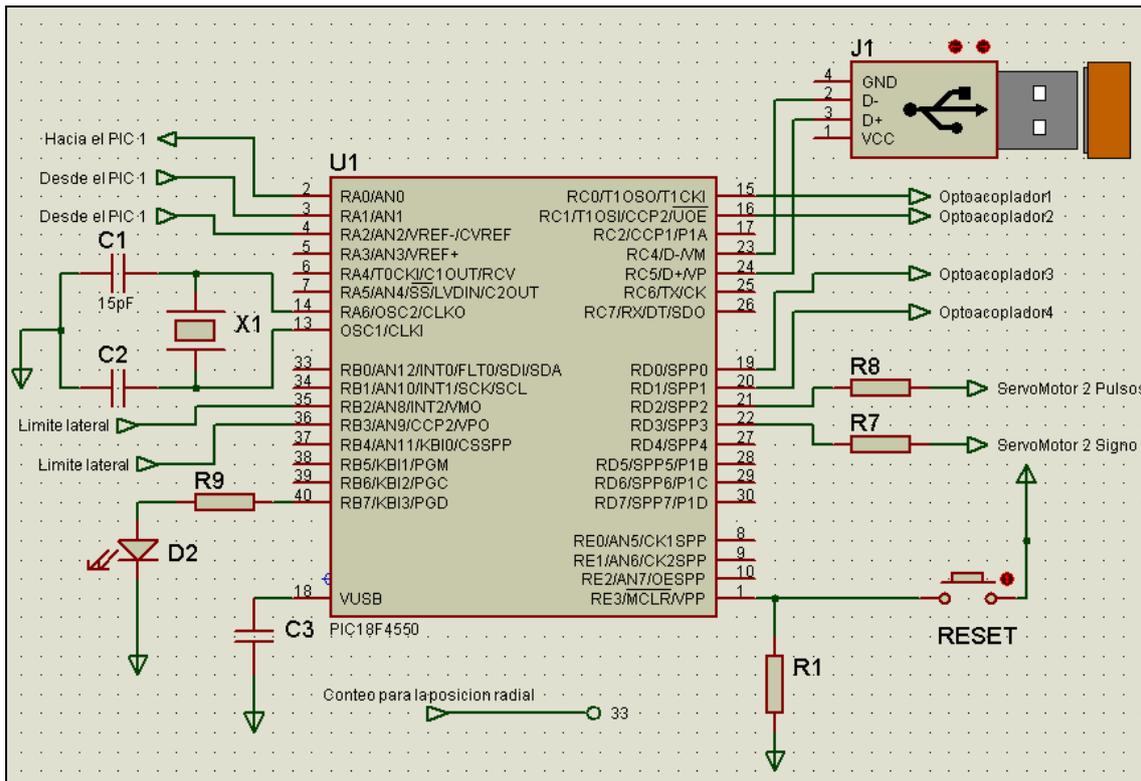
En las siguientes dos imágenes se muestran todas las conexiones entre los microcontroladores y el resto de componentes. La electrónica utilizada es sencilla, la complejidad del proyecto radica en la programación y sincronización de los PIC.



(Proteus)

Figura 5.16 Conexiones del PIC 1 con el resto de los componentes

Las resistencias R4, R5 y R6 que se muestran en la figura 5.16, tuvieron que colocarse para referenciar las señales entre los dos microcontroladores, pues en el momento es que se leía la entrada, si el otro microcontrolador aún no había asignado un valor a esa señal se reconocía como si estuviera al aire y se comportaba como si tuviera 5 voltios a la entrada cuando en realidad esto no era cierto.



[Proteus]

Figura 5.17 Conexiones del PIC 2 con el resto de los componentes

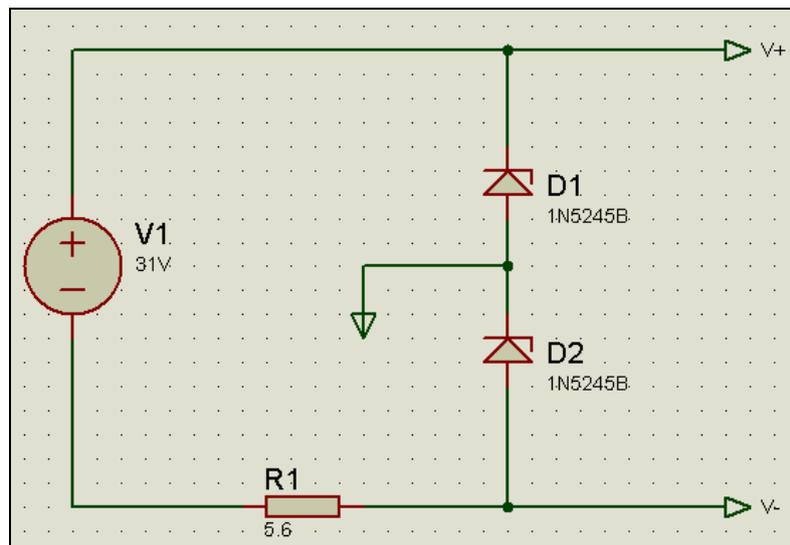
5.1.4. Alimentación eléctrica

Solo se contaba con dos fuentes C.C. para trabajar, y las demandas en los niveles de voltaje utilizados eran bastante variadas. Por esta razón se tuvo que idear la forma de descomponer el voltaje principal para alimentar todos los circuitos. En la tabla 5.2 se muestran los niveles de voltaje necesarios.

Tabla 5.2 Niveles de voltaje para la alimentación

	Voltaje	Circuito
Digital	5V	PIC 1 y 2, Sensor de temperatura, Limitadores de carrera
	$15V_{\text{Min}}-24V_{\text{Max}}$	Sensor C.C.
	$\pm 6V_{\text{min}} - \pm 22V_{\text{max}}$	Amplificadores Operacionales
Potencia	12V	Motor a pasos
	24	Rele, freno magnético, alimentación principal del servo 2, algunas señales de control del servoamplificador 1

Para resolver el inconveniente de las diversas alimentaciones se utilizó una fuente con dos diodos zener (ver figura 5.16).

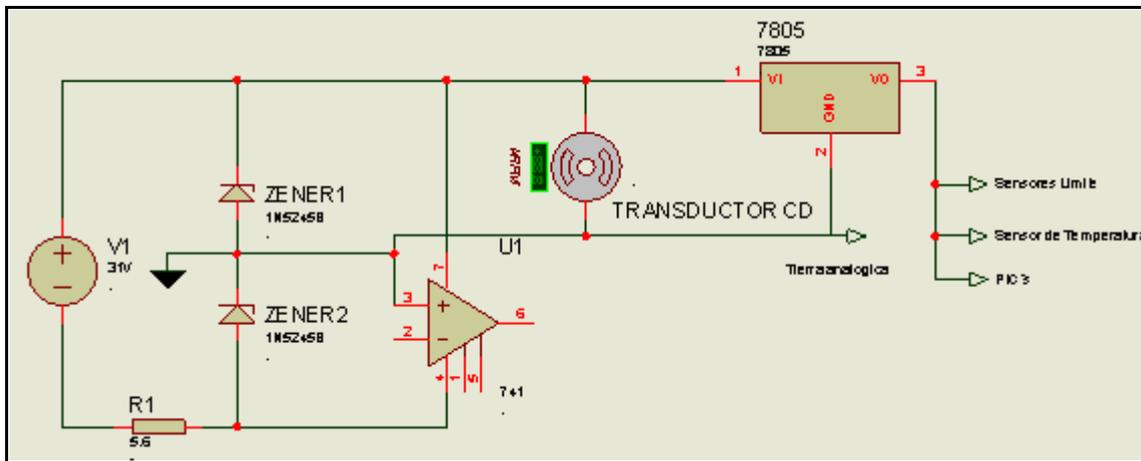


(Proteus)

Figura 5.18 Creación de una tierra virtual y alimentación positiva y negativa a partir de una sola fuente

Se realizó un estimado de las distintas demandas de corriente de los diferentes componentes que se iban a conectar a esas tres terminales, y a partir de esa estimación se calculó la potencia de los zener y la resistencia R1. El valor de voltaje de los zener se eligió pensando en que pudieran alimentar el sensor de C.C. y los OPAMP. Luego se conectó un 7805 para los requerimientos de 5V.

Todas las derivaciones de voltaje se explican en la figura 5.17, nótese como la tierra digital para todos los circuitos se encuentra en medio de los diodos zener.



(Proteus)

Figura 5.19 Diagrama de la distribución de voltajes en la parte digital

Para la parte de potencia simplemente se utilizó un 7812 para derivar los 12V de la fuente principal de 24V.

5.2. Descripción del software

Todo el software del sistema consta de tres rutinas principales, la primera es el programa que corre en la computadora en el lenguaje Java, las otras dos corresponden a cada uno de los programas que corren en los microcontroladores.

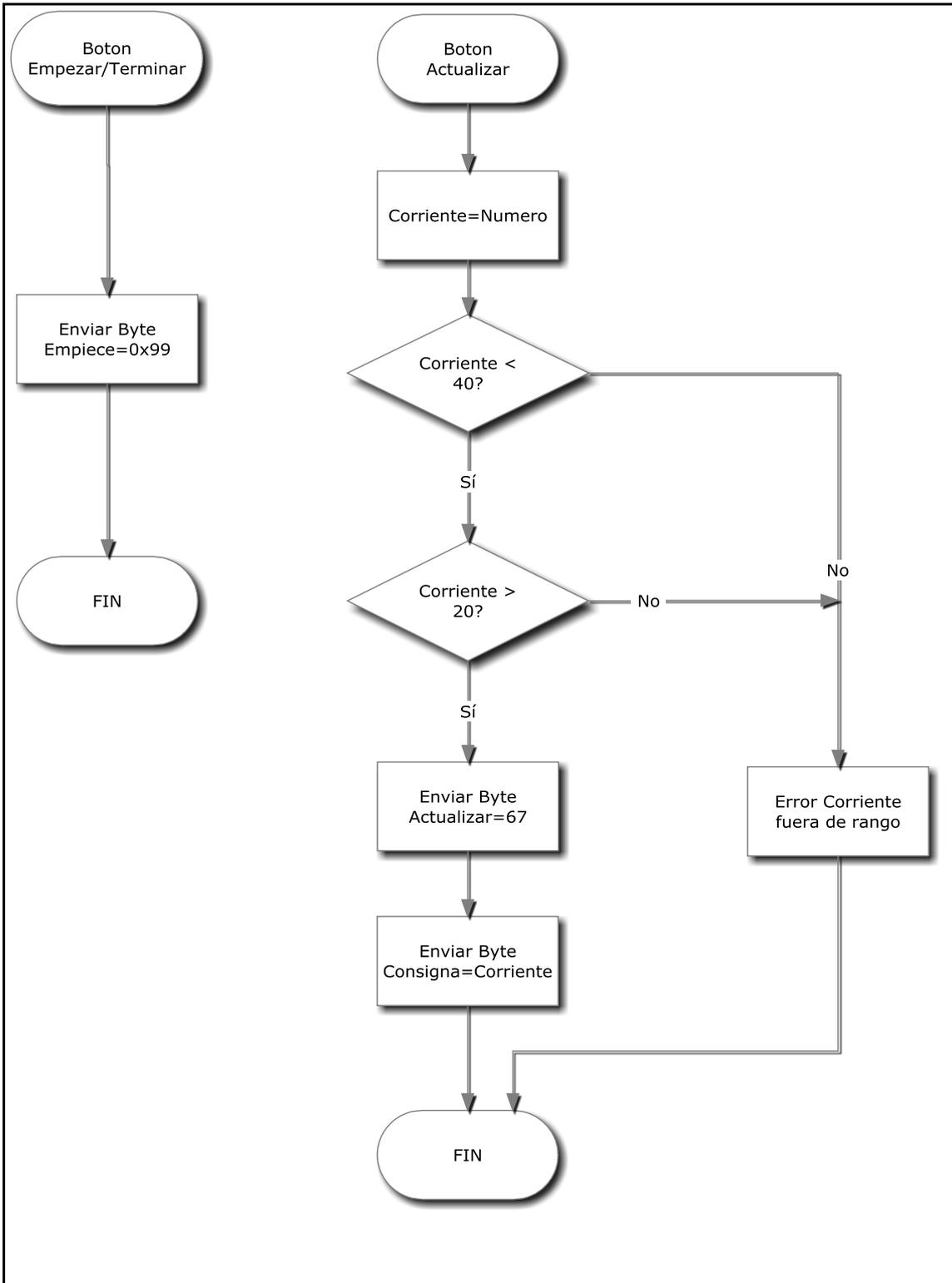
5.2.1. Programa en la computadora

En el diagrama de la figura 5.18 se muestra como funcionan las rutinas con dos eventos al inicio del programa.

Al presionar inicio, solamente se envía un byte al micro 1 para que empiece a ejecutar su programación.

Con el botón actualizar se sigue el algoritmo de la derecha que se explica en el siguiente pseudocódigo.

1. Leer dato.
2. Verificar que la corriente introducida esté en el rango correcto.
3. Enviar byte de reconocimiento.
4. Enviar byte con la corriente.



(SmartDraw)

Figura 5.20 Diagramas de flujo del software en la computadora

Una vez concluido el proceso el usuario tenía dos opciones: recuperar la información de los PIC o graficar la información que ya se encontraba en la computadora. La información que podía recuperar o graficar era: la corriente, la

temperatura o la posición polar. En la figura 5.18 se muestra la subrutina para actualizar.

Pseudocódigo Leer datos:

1. Enviar Byte de “recuperar datos”.
2. Leer bloques de 8 bytes.
3. Verificar byte de parada en FF.
4. Verificar arreglo no nulo.
5. Complemento a dos.
6. Conversión a formato decimal.
7. Guardar archivo.

El sistema trabajaba sobre complemento a 2, 8 bits. La conversión a decimal se escala diferente para cada una de las variables, y la recuperación es distinta según el PIC, pues en el caso del microcontrolador 1 las mediciones de temperatura y corriente se guardan una a la par de la otra, y en el PIC 2 cada dato de posición se define por dos bytes.

Pseudocódigo Graficar:

1. Abrir archivo
2. Cargar en arreglo.
3. Graficar

El pseudocódigo para graficar es más sencillo. Al momento de realizar la gráfica se escoge entre un gráfico XY o uno del tipo polar.

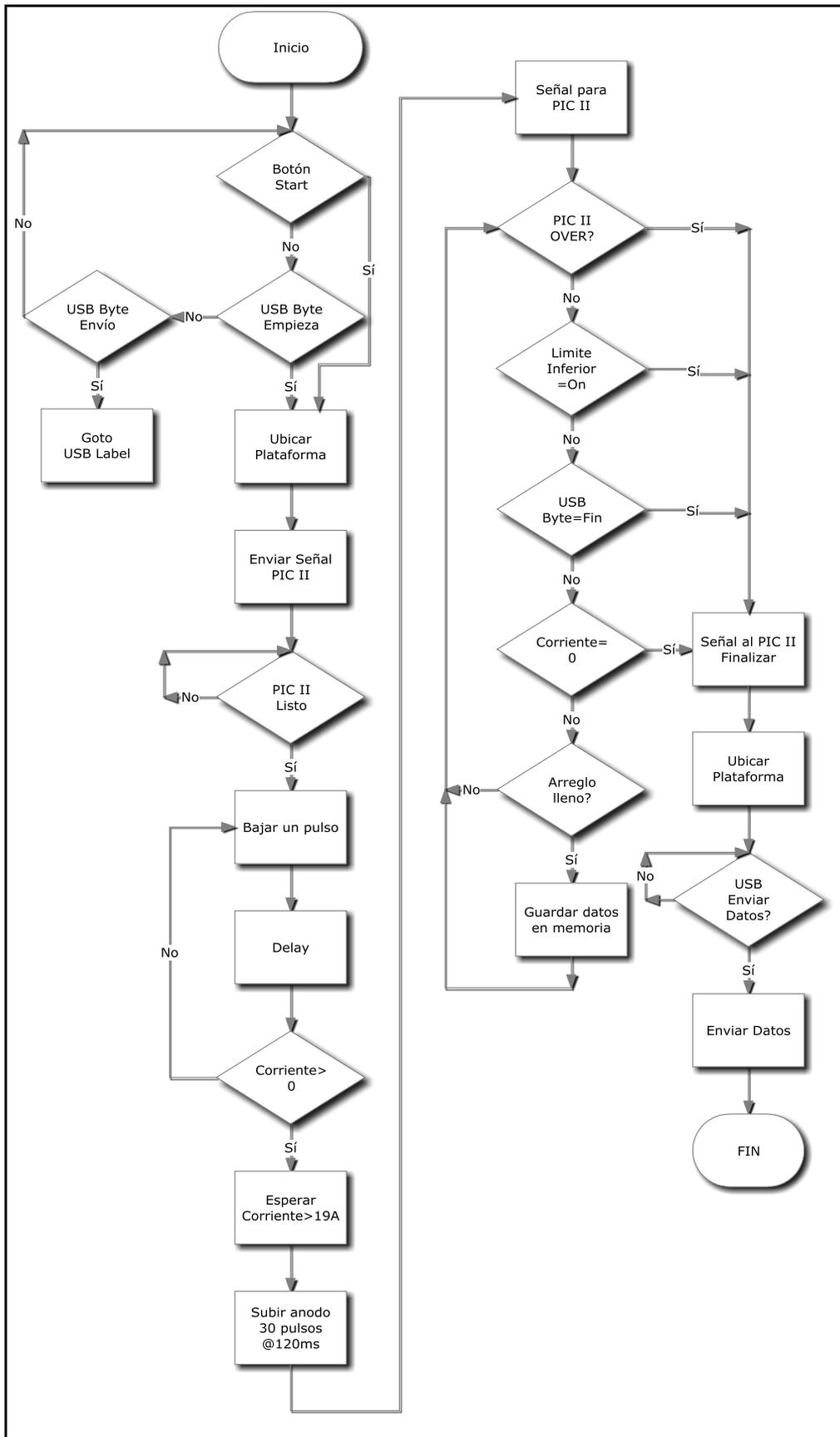
5.2.2. Programa del PIC I

El PIC I esta encargado de subir y bajar la plataforma que sostiene el ánodo, también lee el sensor de corriente y el de temperatura. Como una forma de introducir al lector a la secuencia de ejecución se presenta un pseudocódigo con la estructura principal del programa:

Pseudocódigo del PIC I

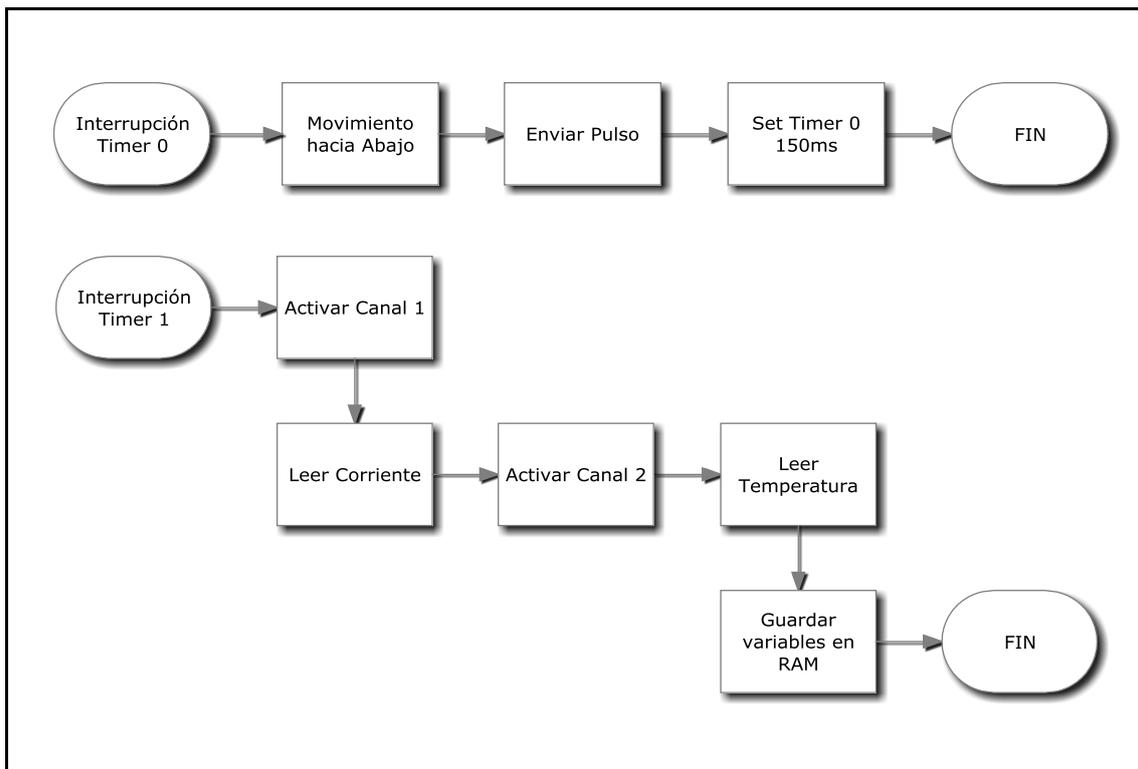
1. Empezar.
2. Ubicar plataforma a 1cm del cátodo.
3. Enviar señal al PIC II.
4. Esperar al PIC II.
- /**Atención: Esta parte es la más crítica, pues es la forma de producir el arco
5. Bajar lento hasta que la corriente sea > 0 (Electrodos en contacto).
6. Esperar una corriente estable $> 19A$.
7. Subir unos milímetros (Creación del arco).
- /** Fin de Atención
8. Enviar señal al PIC II.
9. Empezar el descenso y consumo del electrodo.
10. Finalizar.
11. Enviar señal al PIC II.
12. Guardar datos.
13. Ubicar plataforma en la parte alta.
14. Esperar petición de datos de la computadora.

En la figura 5.19 se muestra el diagrama de flujo del PIC I para entender de forma más detallada el funcionamiento de la programación. Nótese como diversas circunstancias podían dar por terminado el proceso.



(SmartDraw)
Figura 5.21 Diagrama de flujo del PIC 1

En el caso de las interrupciones (ver figura 5.20) el Timer 0 se configura para que envíe un pulso de bajada cada 150ms, esta interrupción se activa después de enviar la señal al PIC II para que empiece su movimiento y se desactiva luego de que termine el lazo principal del sistema. En el caso de la interrupción de Timer 1 se leen los convertidores analógico-digital y se almacenan en el arreglo de variables de temperatura y corriente que luego pasan a memoria no volátil.



(SmartDraw)

Figura 5.22 Interrupciones del PIC I

5.2.3. Programa del PIC II

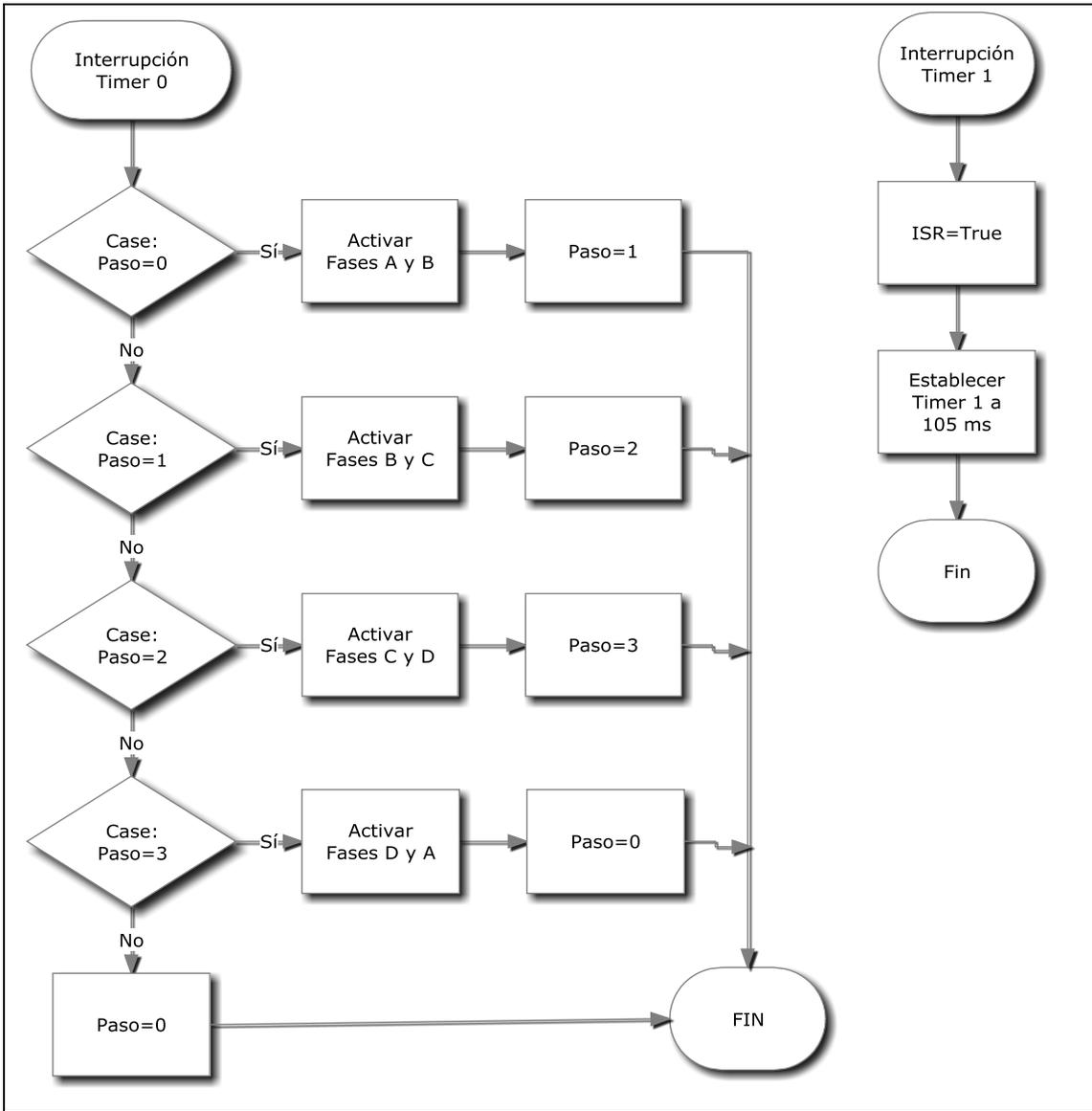
El PIC II se encarga de girar el cátodo, controlar el movimiento radial y recabar los datos de este. Para que el PIC II entre en funcionamiento solo se puede hacer a través de la orden del PIC I (ver figura 5.22). Al igual que en el PIC I, al inicio del programa se puede recuperar la información del último proceso realizado que se halle en la memoria flash, por medio de la comunicación USB. A continuación se presenta un pseudocódigo para un entendimiento más fácil.

Pseudocódigo del PIC II

1. Esperar señal del PIC I.
2. Ubicar electrodo sobre la parte central del cátodo.
3. Enviar señal al PIC I.
4. Esperar (En este momento se está esperando que el PIC I produzca la chispa).
5. Mover el ánodo hacia fuera y rotar el cátodo.
6. Guardar posición
7. Enviar señal al PIC I.
8. Ubicar electrodo a su posición inicial.
9. Esperar petición de datos.

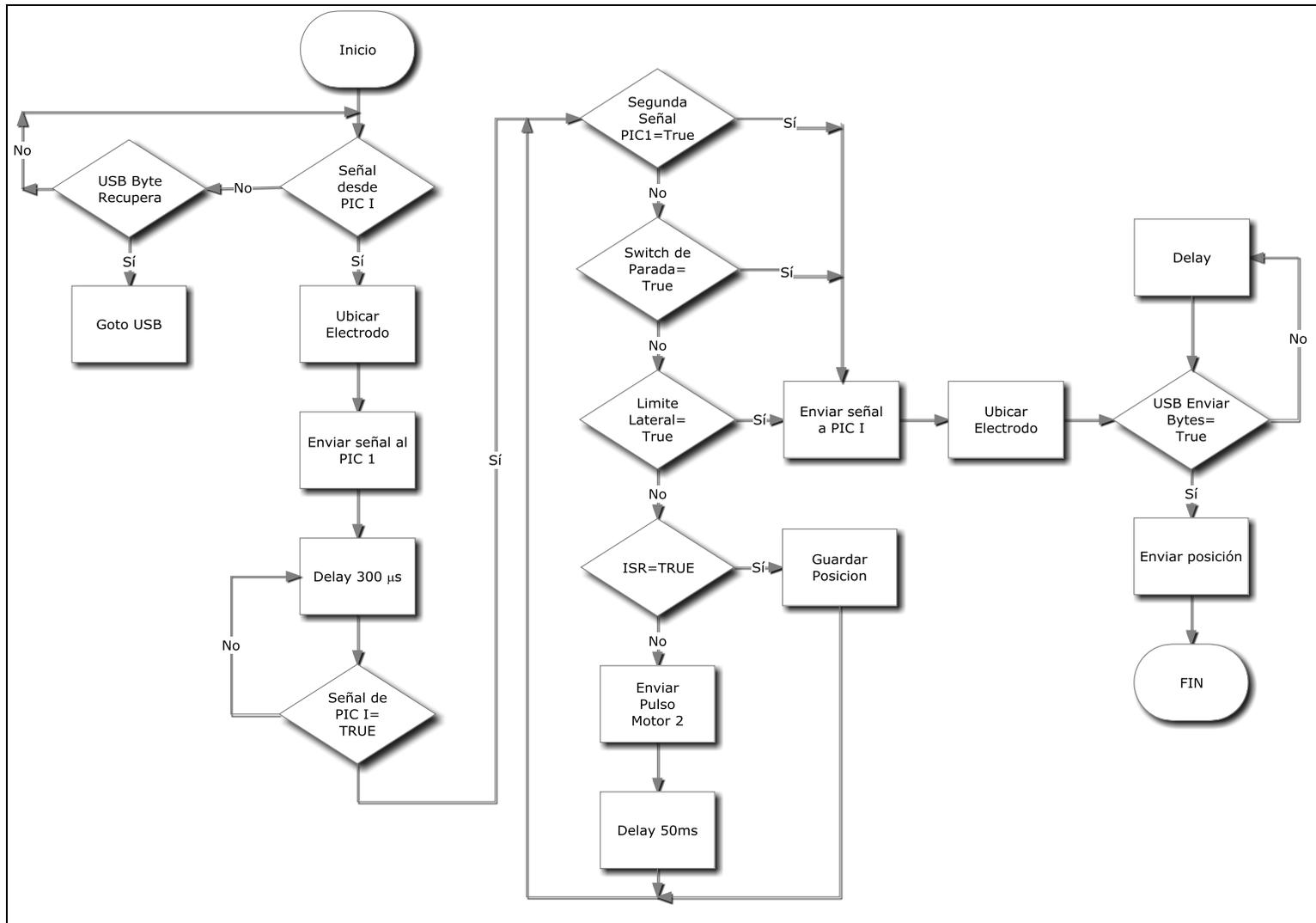
En ambas programaciones, después de que termina el proceso un PIC le envía al otro una señal de finalización; esta señal depende de quien termine primero, o quien cruza un sensor de final de carrera primero. Cuando se recibe esta señal los controladores entienden que el otro ya finalizó y que debe hacer lo mismo y pasar a la etapa de ubicación.

En el caso de las interrupciones (figura 5.21) el Timer 0 se encarga de energizar las dos fases correspondientes, realizando un “case” basado en el estado anterior. Esta interrupción está configurada para darse cada 0.7 segundos, en cada caso lo que se realiza es un encendido de dos de los optoacopladores, los cuales activan las fases del motor. En el Timer 1 se levanta una bandera para indicar que se debe realizar un almacenamiento de la cantidad de pulsos detectados. La interrupción externa se activa cuando llegan los pulsos de la fase “A” del motor dos, a través del encoder incremental. Aquí simplemente se suma uno a la cantidad de pulsos ya registrados cada vez que se entra a la interrupción.



(SmartDraw)

Figura 5.23 Rutinas de atención de interrupciones PIC II



(SmartDraw)

Figura 5.24 Diagrama de flujo de los programas del PIC II

Capítulo 6: Resultados y análisis

En este capítulo se presentan los resultados del proyecto y del comportamiento del sistema. En estos se incluye el de la corriente, la temperatura, la posición y otros aspectos que también fueron importantes durante el desarrollo.

6.1. Resultados

6.1.1. Resultados preliminares

Alta frecuencia

En una primera etapa de prueba se colocó el sensor de corriente continua al cable del electrodo. El sistema estaba programado con un control PID basado en la lectura del sensor de C.C. y aún no existían las etapas de ubicación. Antes de esta prueba no se habían hecho experimentos conjuntos entre la máquina de soldar, la máquina de nanotubos y la electrónica. La prueba fue altamente destructiva pues las fuentes dispararon las alarmas de sobrevoltaje, el servomotor 1 también disparó una alarma de velocidad excesiva y se quemó uno de los diodos zener.

Al principio parecía que había un problema de aislamiento entre la etapa de potencia y la digital, pero desarrollando un par de pruebas más se llegó a la conclusión de que la potencia de la máquina de soldar podía afectar la electrónica sin existir una conexión física entre ambas. Todo esto se dio a causa de una configuración en la máquina de soldar, que utiliza una opción de alta frecuencia para romper el dieléctrico y facilitar la soldadura a mano.

Esta componente de alta frecuencia viajaba a través de los motores y se reflejaba como ruido de alta potencia que afectaba las fuentes de voltaje alcanzando picos de tensión de hasta 80 V en algunos casos. El ruido era tan potente que podía realizar inducción electromagnética en la fuente de la

alimentación digital a pesar de no encontrarse físicamente conectada, pues incluso la conexión a tierra se había removido.

Al principio se pensó que podía ser que la máquina de soldar estuviera demandando mucha potencia a la red eléctrica y esto estuviera afectando la alimentación de las fuentes. Esto porque al conectar el multímetro a la red eléctrica, variaba en voltajes de más de 200V. No obstante el departamento de mantenimiento comprobó que el problema no era el tendido eléctrico, pues al utilizar otro multímetro de mayor calidad el voltaje de la red se mantuvo sin variación.

Por todas esas razones se determinó que el problema era de ruido, que era capaz de modificar el comportamiento del multímetro y de las fuentes de voltaje cercanas.

Se realizó un poco de investigación y se encontró en el manual de usuario como debían ser aterrizados los objetos, según el anexo 1 y 2. Para resolver el problema se trató de aterrizar la máquina de nanotubos, las fuentes de voltaje y los servo amplificadores, pero nada de esto dio resultado. Se trataron de aislar los circuitos electrónicos y los servos pero igualmente el montaje de los motores sobre la máquina de nanotubos era suficiente conexión para causar comportamiento errático. Se trató de utilizar una placa de metal conectada a la máquina para servir como un canal de aterrizaje del ruido, lo que tampoco dio resultado.

El problema básicamente era que la máquina de soldar a pesar de tener una conexión a tierra, estaba muy alejada de la conexión física, a causa de que la caja de breakers que se encontraba a unos diez metros y en un segundo piso. El cableado ya no se podía cambiar pues representaba parte de la estructura física del edificio y no se podían alejar los objetos porque el espacio no lo permitía y la máquina no se podía aterrizar más porque ya tenía su conexión a tierra.

Se investigó un poco en el manual de usuario sobre otros dos métodos para crear el arco eléctrico. Uno de ellos consiste en raspar la superficie del cátodo con la punta del ánodo, pero este método no se puede realizar con la estructura de la máquina ya que tiende a quebrar la punta del electrodo. El segundo método es poner en contacto los electrodos y luego ir alejando poco a poco el ánodo, lo que resulta más viable, aunque introduce un obstáculo pues el arco eléctrico es más inestable sin la alta frecuencia.

Con el método de la alta frecuencia se puede romper el dieléctrico y crear un arco, cuando se van acercando los electrodos, incluso desde unos 5cm antes de hacer contacto, mientras que el método de contacto se pierde la chispa si se sobrepasa un rango de medio centímetro aproximadamente. Una vez escogido este último método, se reprogramó el control para que el ánodo bajara hasta tocar el cátodo, se hacía una pausa para luego subir el ánodo unos milímetros y entraba en juego la señal de control, solo que hubo un inconveniente con respecto a la relación altura-corriente.

Corriente invariable a la altura:

La hipótesis principal era que el sensor de corriente continua mediría la variación en la corriente, la cual a su vez cambiaría inversamente proporcional a la distancia de separación entre electrodos. Este desgraciadamente no fue el caso.

La corriente tendía a permanecer casi invariable como se muestra en la figura 6.2, a pesar del cambio en la altura del ánodo. Solo en dos situaciones se notaba un ligero aumento en la corriente como se observa en la figura 6.1. Esto sucedía cuando los electrodos estaban a punto de hacer contacto o un instante antes de perder la chispa a causa de la separación entre electrodos.

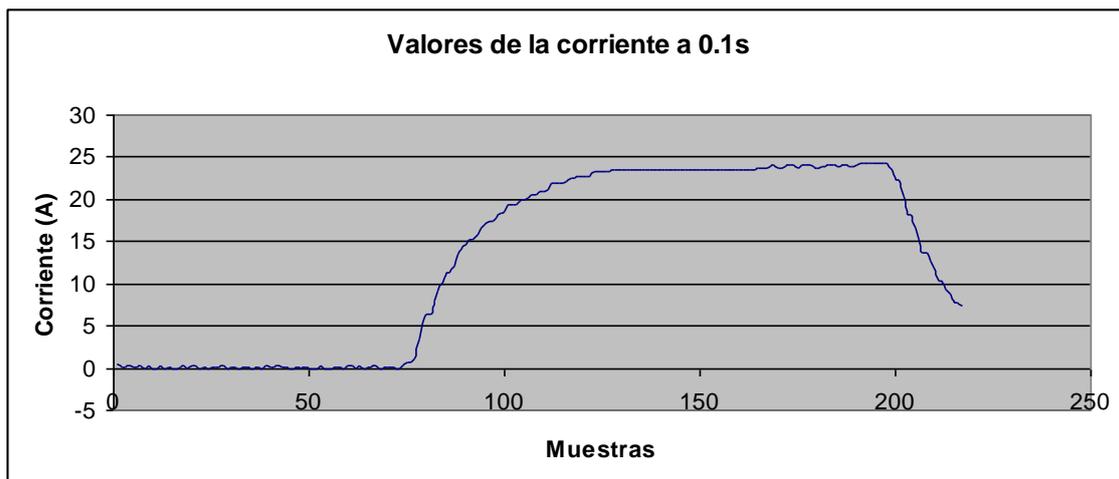
A causa de ese comportamiento no se pudo usar el sensor de corriente directa como una señal de seguimiento para el control de la planta, por dos motivos: la variación en la corriente era muy pequeña y el aumento en la

medición de la corriente no aclaraba si el electrodo debía subir o bajar. El comportamiento se muestra en la tabla 6.1.

Tabla 6.1 Efectos de una señal de control incorrecta

Retroalimentación	Acción de control	Condición Real	Efecto
Aumento en la corriente medida	Alejar	Electrodos muy cerca	OK
		Electrodos muy alejados	Pérdida del arco
	Acercar	Electrodos muy cerca	Quiebra el electrodo
		Electrodos muy alejados	OK

Agregado a esto, la corriente podía variar por otros factores que no fueran la altura, como por ejemplo: la constancia del gas, otros residuos de carbono en el cátodo, o el movimiento del electrodo en forma radial. Estas variaciones se pueden observar incluso antes de que se corte el paso de la corriente. Nótese en la figura 6.1 la inestabilidad más allá de las 150 muestras y un ligero aumento antes de empezar a caer.



(Microsoft Excel)

Figura 6.1 Comportamiento de la corriente

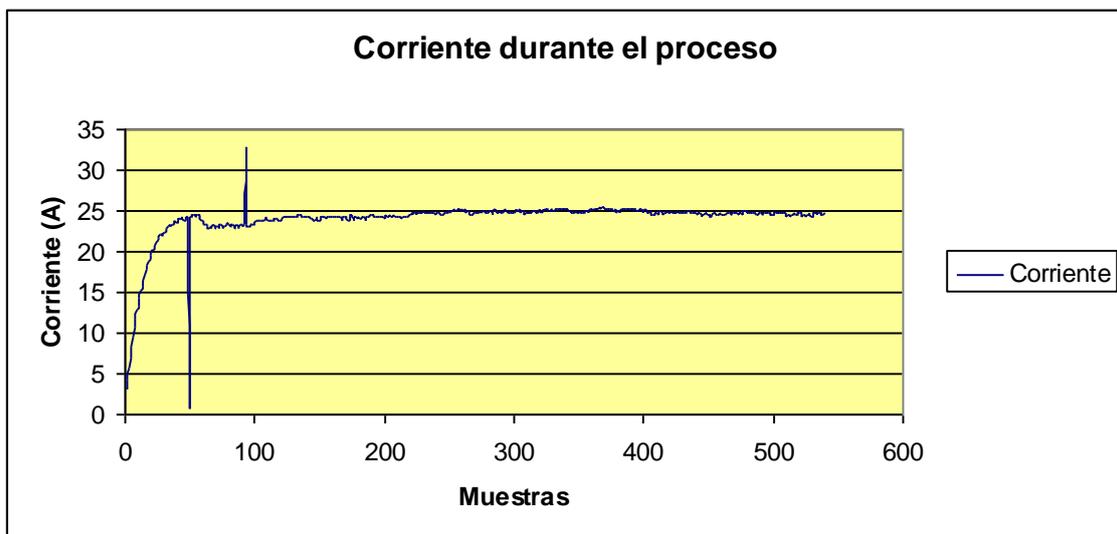
Por lo expuesto anteriormente se eliminó el control PID de la programación del controlador y en su lugar se programó una serie de acciones como la

ubicación inicial, y la tasa de bajada constante, basándose es estados precisos de la lectura de la corriente.

6.1.2. Resultados definitivos

Altura y Corriente:

Para cumplir con el objetivo de una corriente que no llegara a cero en ningún momento durante el proceso, se tuvo que adaptar el sistema para que una vez creada la chispa empezara a bajar a un ritmo constante. Para esto se utilizó la interrupción del timer como se explicó anteriormente, para bajar el ánodo a una tasa de desgaste conocida.



(Microsoft Excel)

Figura 6.2 Corriente en un proceso más largo

En la 6.2 se muestra el comportamiento de la corriente durante el proceso. Los picos en la corriente son datos guardados intencionalmente por el PIC para observar dos etapas primordiales. La información acerca de la corriente se empieza a almacenar desde el momento en que se produce una corriente, lo que ocurre cuando los dos electrodos entran en contacto. El pico inferior marca el punto al momento en que se empieza a levantar el ánodo poco a poco. El pico superior es un dato de 34A guardado adrede, para reconocer el momento

en que el ánodo ha dejado de subir y ha comenzado a bajar para consumir el electrodo.

Tiempo de muestreo:

Para calcular el tiempo de muestreo se tomó como base la figura 6.1. En ella la estabilización de la corriente ocurre entre las muestras 73 y 125. Cada muestra se toma con intervalos de 100ms, dando como resultado un tiempo de estabilización de: $100\text{ms} \times (125-73) = 5,2\text{s}$. Dado que la estabilización de los sistemas usualmente ocurre a 4τ , se calcula τ para este sistema en particular en 1.3s. Como criterio de diseño en automatización se requiere que el tiempo de muestreo sea igual o menor a una décima del tiempo dominante, esto es por lo tanto 130ms o menos. Como el tiempo empleado era de 100ms, se decidió que los tiempos hallados eran aceptables.

Tiempos de consumo y de los movimientos:

Tres variables son primordiales durante la ejecución de la soldadura: el tiempo de bajada, el movimiento radial y la rotación del cátodo. El primero de ellos es vital para la constancia de la corriente y el plasma. En las otras dos se debe encontrar un equilibrio entre la velocidad del movimiento radial y la velocidad de rotación del cátodo, para lograr una espiral adecuada.

Para tener un tiempo base acerca del desgaste, se hizo una prueba a 19A en la que se dejaba que se consumiera el grafito durante cierto tiempo, la tabla 6.2 muestra unas primeras mediciones.

Tabla 6.2 Desgaste del electrodo

Prueba @ 19A	Desgaste (mm)	Tiempo (s)
1	1-2	50
2	2-3	55
3	3-4	86

Se tomaron estos valores para establecer un promedio del consumo, con un tiempo de 625ms por pulso. La corriente de 19A resultó muy débil para mantener el arco, por lo que se decidió usar una corriente de 24A. Luego se realizó una experimentación a modo de prueba y error para determinar la mejor tasa de descenso, lo que se hizo utilizando un tiempo base con el cual: si durante el proceso la punta se quebraba, entonces se aumentaba el tiempo para que descendiera más lento; por el contrario, si el arco se perdía a causa de la distancia entonces se disminuía el tiempo para que bajara más rápido. Se determinó que para el argón la mejor tasa de consumo se encontraba en 178ms/pulso. En cierto momento se agotó el argón y se procedió a utilizar helio, por esta razón se volvió a ajustar el tiempo de bajada y esta vez se definió en 150ms/pulso.

La sincronización entre el movimiento radial y la rotación debía hacerse de tal forma que la espiral fuera práctica. La forma descrita por el ánodo dependía de la velocidad con que se movía el electrodo desde el centro hacia fuera en función de la velocidad de rotación del cátodo. Así por ejemplo: si el movimiento radial era muy lento en comparación con la rotación, se producía una espiral muy cerrada; si el movimiento radial era muy rápido en relación al giro, entonces iba a entregar una espiral muy abierta; por último, si los dos movimientos estaban calibrados adecuadamente podían describir una espiral más uniforme.

Para la coordinación de movimientos primero se ajustó la velocidad del cátodo, al mismo tiempo se observó el efecto de la velocidad en la constancia del plasma, luego se calibró el movimiento radial para obtener la espiral deseada. En la figura 6.3 se puede observar el resultado de diferentes tiempos y como afecta la forma de la espiral; en el lado derecho se muestra la espiral definitiva con tiempos calibrados.

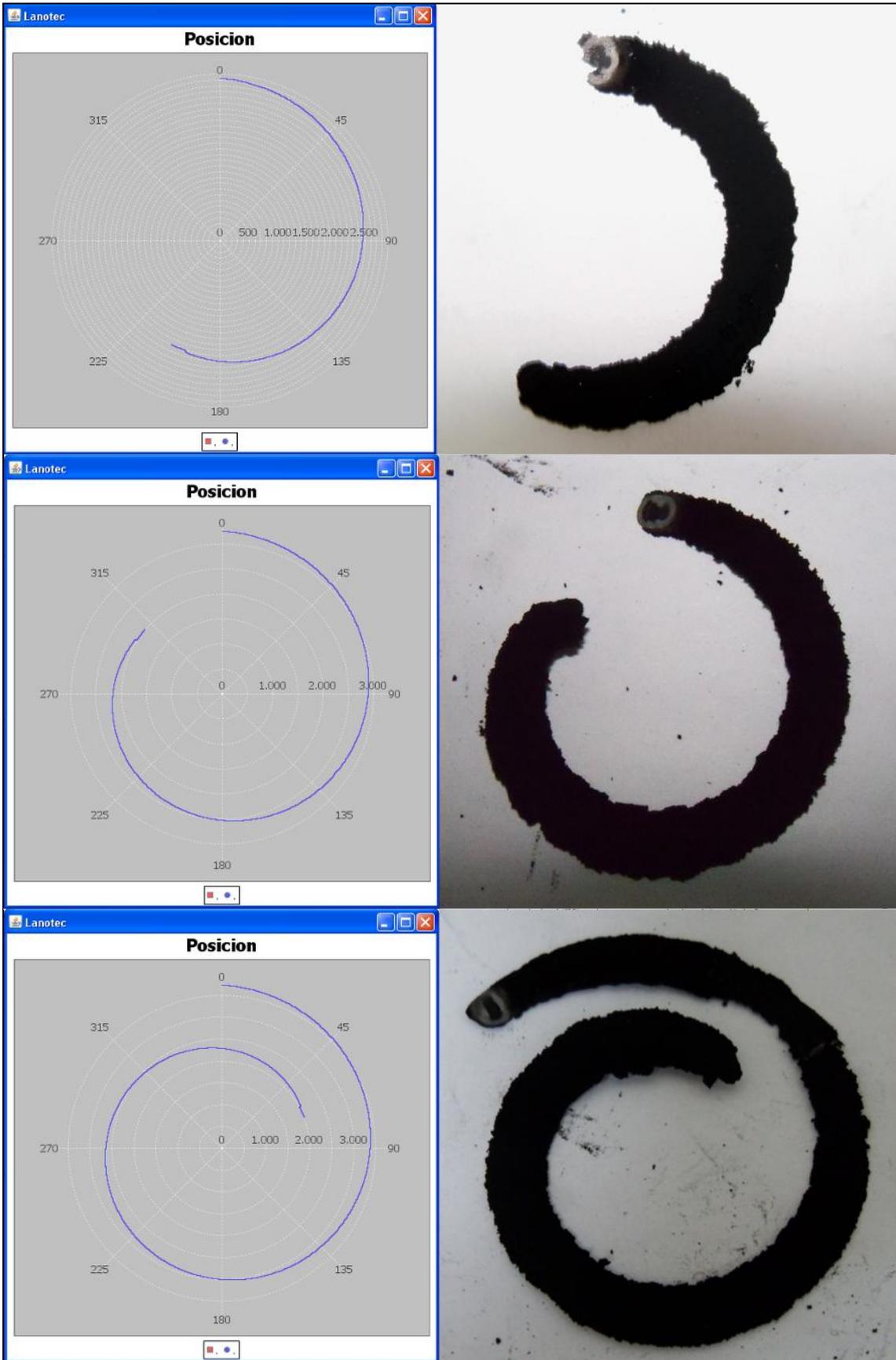


(GIMP)

Figura 6.3 Espirales a diferentes tiempos

En la figura 6.4 se muestran las gráficas obtenidas de la computadora a partir de la retroalimentación de la posición radial que enviaba el motor 2. Para observar mejor el grado de cumplimiento con el objetivo propuesto, a la par se muestra la espiral de carbón recolectada después de la soldadura.

La distancia radial está graficada contra el ángulo que en realidad se refiere a un tiempo en el que el cátodo se desplaza cierta cantidad fija de grados. La distancia que presenta el grafico esta dada por número de pulsos: una vuelta del tornillo necesita 1000 pulsos, la rosca del tornillo define la cantidad de movimiento lineal. Cuando la rosca mide 0.5cm, por lo tanto 1 pulso desplaza el ánodo 0.005mm, o lo que es lo mismo 1000 pulsos desplazan el electrodo medio centímetro.

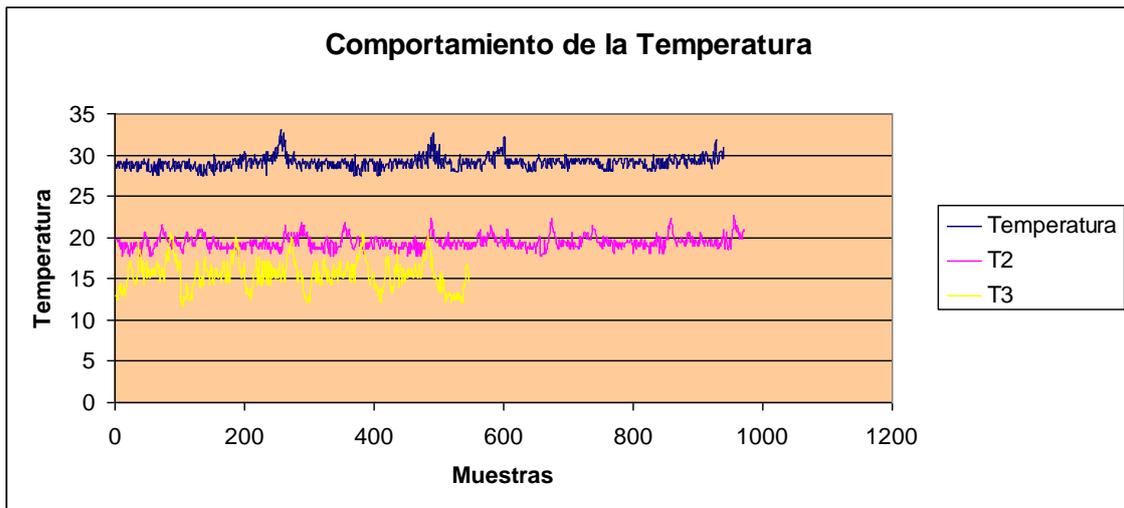


(GIMP)

Figura 6.4 Comparación de las espirales reales contra las de computadora

Temperatura:

El comportamiento de la temperatura fue bastante constante según se pudo observar en las gráficas de la figura 6.5. A pesar del ruido, se puede distinguir un valor promedio que se mantiene durante el proceso. Es esa misma gráfica se observa como la temperatura del agua va en aumento con cada nueva corrida del proceso.



(Microsoft Excel)

Figura 6.5 Temperatura en tres procesos distintos

Por ejemplo para la serie Temperatura el promedio fue de 29C°, T2 fue de 19C° y T3 se mantuvo en 15C°.

Filtrado del aire:

En cuanto al filtro el procedimiento que se utilizó fue el siguiente; se pesó el electrodo de grafito antes de empezar el proceso y después de finalizado, esta diferencia es la cantidad de material que se consumió debido al plasma. Por otra parte el algodón se pesó antes y después del proceso y la diferencia se refiere a la cantidad de material filtrado. Estos resultados se presentan en la tabla 6.3.

Tabla 6.3 Porcentajes obtenidos en el filtro respecto al material consumido

Peso de la barra (mg)			Peso del algodón (mg)			%
Inicial	Final	Diferencia	Inicial	Final	Diferencia	
1304.7	1114.1	190.6	427.7	430.3	2.6	4.96
1046.9	887.8	159.1	423.6	427.0	3.4	2.14
1122.4	968.3	154.1	427.3	436.2	8.9	5.77
1123.9	929.1	194.8	401.5	412.3	10.8	5.54

En la figura 6.6 se muestra la diferencia en el algodón con los residuos de carbono.



(GIMP)

Figura 6.6 Algodón con residuos de carbono

6.2. Análisis

a. Corriente

Se observa que el cambio en la corriente de la máquina no se da de forma brusca al entrar en contacto los dos electrodos, como se creería que trabaja un proceso de soldadura. Al parecer la máquina de soldar realiza un incremento gradual de la corriente hasta llegar al máximo establecido por el usuario. Esto es importante porque si se empezaban a separar los electrodos antes de que la corriente estuviera en un nivel estable la chispa se volvería inconsistente y se hubiera perdido desde el comienzo del proceso.

El segundo aspecto a considerar es que la corriente permanece dentro de un rango muy pequeño de variación una vez establecida la chispa, a pesar de que existen variaciones en la altura. Esto se adapta al objetivo de obtener una gráfica de corrientes constantes, pero establece una limitante al sensor de corriente continua pues no se puede utilizar como realimentación de estado lineal.

b. Consumo del electrodo

Al utilizar dos gases de protección para la soldadura, se observó que el helio tenía la ventaja de producir un plasma más constante, lo que provocaba una espiral más larga y e invariable como consecuencia de la estabilidad en la chispa. Además, como la tasa de descenso fue menor (150ms/pulso) se llegó a consumir más electrodo y por tanto, se obtuvo más producto, lo que es visible en la superficie del cátodo como más residuo de carbón.

La velocidad de rotación del cátodo tuvo que definirse según la estabilidad de la chispa, pues si el cátodo rotaba muy rápido, el efecto que provocaba era dejar la chispa rezagada respecto a la posición del electrodo, lo que conducía a la pérdida total de la descarga eléctrica. Finalmente se llegó a un valor de 0,7s por paso como la velocidad adecuada de rotación.

Por último se observó que la chispa tendía a perderse para los lugares más externos del cátodo, porque el arco descrito por la rotación del cátodo era más pequeño en los lugares internos y en las partes externas el arco representado era más grande. Como consecuencia de la resolución en grados del motor a pasos (3,4°), en los lugares internos el desplazamiento era suave pero para las partes más externas cada paso era muy brusco. A pesar de eso la espiral puede tomar un tamaño que cubre casi toda el área, pero es recomendable que se utilice un motor de resolución más pequeña.

c. Temperatura

Hubo problemas con ciertos datos que adquirieron mucho ruido, debido a la sensibilidad del sensor de 10mV/C°. Además, el sensor se encontraba dentro de la máquina, muy cerca de la soldadura y sumergido en agua, y existía un blindaje que no estaba aterrizado, pues si se aterrizaba a la máquina podía empeorar el ruido, y si se aterrizaba a la parte digital podía eliminar el aislamiento entre lo digital y la parte de potencia. Todos esos efectos sumados crearon la aparición del ruido en la medición de la temperatura. Aún así se puede dar un promedio bastante exacto de la temperatura del agua.

d. Filtrado

El filtrado no se puede comparar contra otro procedimiento porque en el laboratorio aún no existe una filtración de estos gases. Por lo tanto lo que se ofrece es un punto de partida para que en procesos posteriores se puedan realizar comparaciones. Además lo que se quiere exponer es que efectivamente el gas expulsado contiene partículas de carbón que pueden llegar a las vías respiratorias y causar efectos dañinos a pesar de ser una cantidad pequeña, si se repite varias veces al día y con una exposición prolongada.

e. Problemas generales

Duración del proyecto: Al empezar el proyecto la máquina de nanotubos aún no se encontraba construida, esto significó un atraso en el desarrollo del proyecto a causa de la dependencia de terceros. El tiempo real efectivo que se tuvo para automatizarla fue de unos 4 meses.

Motor a pasos con poca fuerza: el motor a pasos presentó problemas de rendimiento para lograr girar el cátodo. No importaba que tan lento se hiciera el paso, pero no tenía la fuerza suficiente cuando se le agregaba la carga. Al realizar pruebas se notó que el motor podía mover la pieza pero solo en los primeros segundos, luego la corriente que se estaba usando comenzaba a bajar, al medir el voltaje en las fases del motor se descubrió que el voltaje era menor a los 12V de alimentación y no se aplicaba toda la potencia que podía soportar el motor. Al estudiar más el 7812 se encontró que podía suministrar hasta 1A siempre y cuando se le conectara un disipador de calor, se tomó un disipador de una fuente de computadora y el integrado pudo entregar una mayor potencia para mover el cátodo pues su voltaje ya no se caía debido a la demanda de corriente. Al tratar de alcanzar una mayor velocidad este no lograba romper la fricción entre el eje y el empaque contra fugas de agua. Entonces se aceitó y se bajó la velocidad de operación.

Peso de la plataforma: El peso de la plataforma podía ser manipulado fácilmente por la potencia del motor, pero este peso no estaba simétricamente distribuido, lo que producía una torsión en la rosca del tornillo. Por esa razón cuando la plataforma se movía de arriba hacia abajo producía cierta vibración y truncamiento en el movimiento, esos efectos influyeron negativamente en la constancia de la chispa. Esto se resolvió engrasando y reatornillando la guía sobre el tornillo sinfín.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se exponen los alcances y limitaciones del proyecto en cuanto al cumplimiento de objetivos, también se mencionan ciertas mejoras que se pueden aplicar para brindarle un mayor nivel a las soluciones planteadas.

7.1. Conclusiones

- Una vez formada la chispa, la corriente alcanza el máximo establecido y no presenta variaciones importantes durante el recorrido, a pesar de pequeñas variaciones en la altura, a menos que se pierda completamente el arco eléctrico.
- Para lograr un proceso sin interrupciones, los movimientos deben ser suaves, pequeños movimientos bruscos o espurios en el cátodo afectan la continuidad del plasma.
- Los movimientos de rotación y radial con velocidad constante, forman una espiral del tipo logarítmica, esto tiene un defecto pues el desplazamiento y la velocidad a la que se ve sometido el ánodo en la parte más externa es mayor e influye en la longitud de la espiral.
- Las limitaciones del sensor de corriente continua solo se pudieron observar por medio de la interfaz con la computadora.
- Es producto aspirado es muy poco, pero la succión no es la más óptima, por lo que aún deben permanecer residuos sin recolectar.
- La temperatura inicial del agua al comienzo del proceso se mantiene casi constante durante el desarrollo de este.

7.2. Recomendaciones

Se recomienda alguna forma de controlar el proceso, talvez sí se pueda utilizar un sensor de ultrasonido montado entre la placa y el cátodo si se demuestra que la luz no interfiere con la señal y además se debe tener muy presente que el largo del electrodo debe ser el mismo todas las veces que se aplique el proceso si se quiere controlar la distancia desde la placa.

El nivel del agua presenta variaciones debido a un fenómeno denominado efecto sifón, es mejor que se elimine este efecto para el enfriamiento correcto y la medición de la temperatura. Esto se puede lograr instalando una manguera mas ancha en la parte de abajo.

Se debería instalar una capucha extractora para sustituir el extractor de aire pues el residuo expulsado al ambiente aun es significativo y se puede notar al examinar los objetos en el cuarto que poco a poco se ven cubiertos de carbón.

Para poder lograr un mejor proceso y utilizar el ánodo mas largo y que se produzca más producto en masa se podría inyectar el gas desde un lado del cátodo y no desde la boquilla de la pistola, así se asegura que la presión del gas sea la misma y que no varíe dependiendo de la altura en la que se encuentre el electrodo.

El cable del sensor de temperatura contiene un blindaje que no está aterrizado, esto podría estar provocando el exceso de ruido, para solucionarlo se puede eliminar por completo en caso de que sea la causa, o aterrizarlo al chasis de la máquina de nanotubos.

La extracción de los gases debe ajustarse de forma tal que sea lo suficientemente fuerte para extraer todo el producto pero no tanto como para influir en la presión del gas para la creación del plasma.

Capítulo 8: Bibliografía

[1] Carina Rose, "Studies Say, Carbon Nanotubes Could Be As Dangerous As Asbestos," Topnews.in, 23 de mayo, 2008. [En línea]. Disponible en: <http://www.topnews.in/usa>. [Accesado: 27 de julio 2010].

[2] S. Ramírez, "Adaptación del método de descarga de arco voltaico para la síntesis de NTC de pared simple" Tesis de licenciatura, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica, 2010.

[3] Mitsumasa Nishio, "Cooling effect on the growth of carbon nanotubes and optical emission spectroscopy in short-period arc-discharge," *Thin Solid Films*, vol. 464-465, Octubre 2004. [Abstract]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com>. [Accesado: 17 de febrero 2010].

[4] Benavides, et al., "Method of manufacturing carbon nanotubes," U.S. Patent 6,740,224, 25 de mayo, 2004.

[5] Ariel Palazzesi, "Nanotubos de Carbono," neoteo.com, para. 5, 15 de marzo, 2006. [En línea]. Disponible en: <http://www.neoteo.com/nanotubos-de-carbono.neo>. [Accesado: 15 de julio 2009].

[6] Christian Schönenberger, "Multiwall carbon nanotubes," physicsworld.com, para. 5, 2 de junio, 2000. [En línea]. Disponible en: [http://physicsworld.com/cws/article-print/606](http://physicsworld.com/cws/article/print/606). [Accesado: 15 de julio 2009].

[7] Mildred Dresselhaus, "Carbon Nanotubes" physicsworld.com, para. 11, 1 de enero, 1998. [En línea]. Disponible en: <http://physicsworld.com/cws/article/print/1761>. [Accesado: 23 de agosto 2009].

[8] Hong, Seunghun, "Nanotube Electronics: A flexible approach to mobility," *Nature Nanotechnology*, vol 207–208., 2007. [Abstract]. Disponible en www.nature.com. [Accesado: 21 de junio 2010].

[9] "Carbon-based electronics," 5 de diciembre 1997. [En línea]. Disponible en: <http://physicsworld.com/cws/article/news/3356>. [Accesado: 7 de junio 2010].

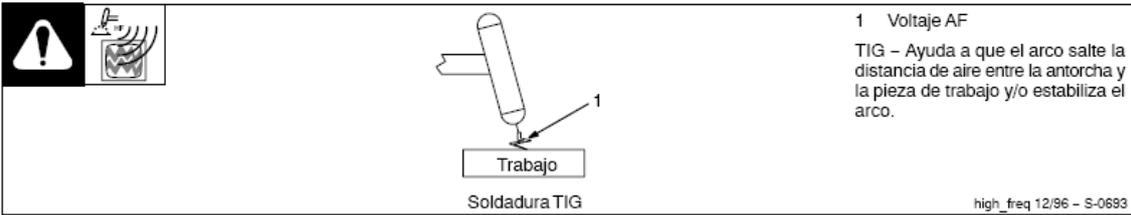
- [10] Jonas Dino, "Carbon Nanotube Sensors for Gas Detection," nasa.gov, para. 1, 29 de marzo 2008. [En línea]. Disponible en http://www.nasa.gov/centers/ames/research/-technology-onepagere/-gas_detection.html. [Accesado: 19 de agosto 2009].
- [11] Meo, Michele "Prediction of Young's modulus of single wall carbon nanotubes by molecular-mechanics based finite element modelling," *Composites Science and Technology*, vol 66, 3 de febrero 2006.
- [12] Demczyk, B.G. et al., "Direct mechanical measurement of the tensile strength and elastic modulus of multiwalled carbon nanotubes," *Materials Science and Engineering*, vol 334, 13 de junio 2002.
- [13] Pop, Eric *et al.*, "Thermal conductance of an individual single-wall carbon nanotube above room temperature," *Nano Letters*, vol 6, 2006.
- [14] Guo, Ting et al., "Catalytic growth of single-walled nanotubes by laser vaporization," *Chemical Physics Letters*, vol 243, 1995.
- [15] Sumio Iijima, "Helical microtubules of graphitic carbon," *Nature*, vol 354, 1991.
- [16] José-Yacamán, M. et al., "Catalytic growth of carbon microtubules with fullerene structure," *Applied Physics Letters*, vol. 62, 1993.
- [17] Jasvinder Singh, Dictionary of Physics. New Delhi: Sterling Publishers, 2007.
- [18] "Regeneration resistance - Motion & Drives Glossary," [En línea]. Disponible en: <http://www.ia.omron.com/support/glossary/7/1227/>. [Accesado: 12 de setiembre 2009].
- [19] Correo electrónico con el doctor José Roberto Vega Baudrit, 3 de mayo 2009.
- [20] Correo electrónico con el doctor José Roberto Vega Baudrit, 3 de junio 2009.
- [21] Miller, Manual del operador Syncrowave 250DX / 350LX, 2006.
- [22] OSHA, "Occupational Safety and Health Standards: Hazardous Materials," Occupational Safety and Health Administration, 1992. [En línea]. Disponible en: <http://www.osha.gov>.

[23] OSHA, "Nanotechnology Health Effects and Workplace Assessments and Controls," Occupational Safety and Health Administration, 2010. [En línea]. Disponible en: <http://www.osha.gov>.

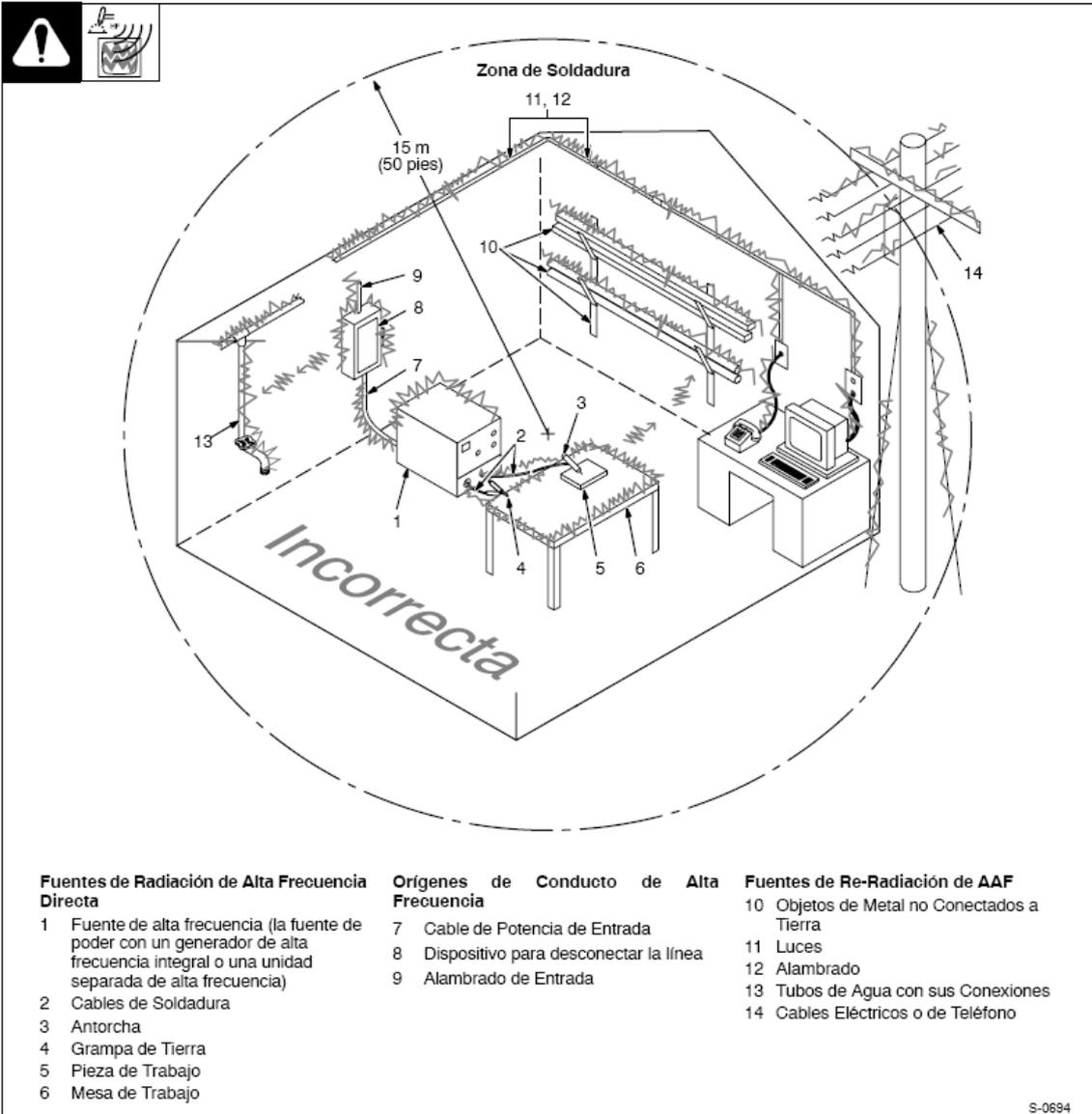
Apéndices

A.1 Alcance del ruido electromagnético

8-1. Procesos de soldadura usándose AF

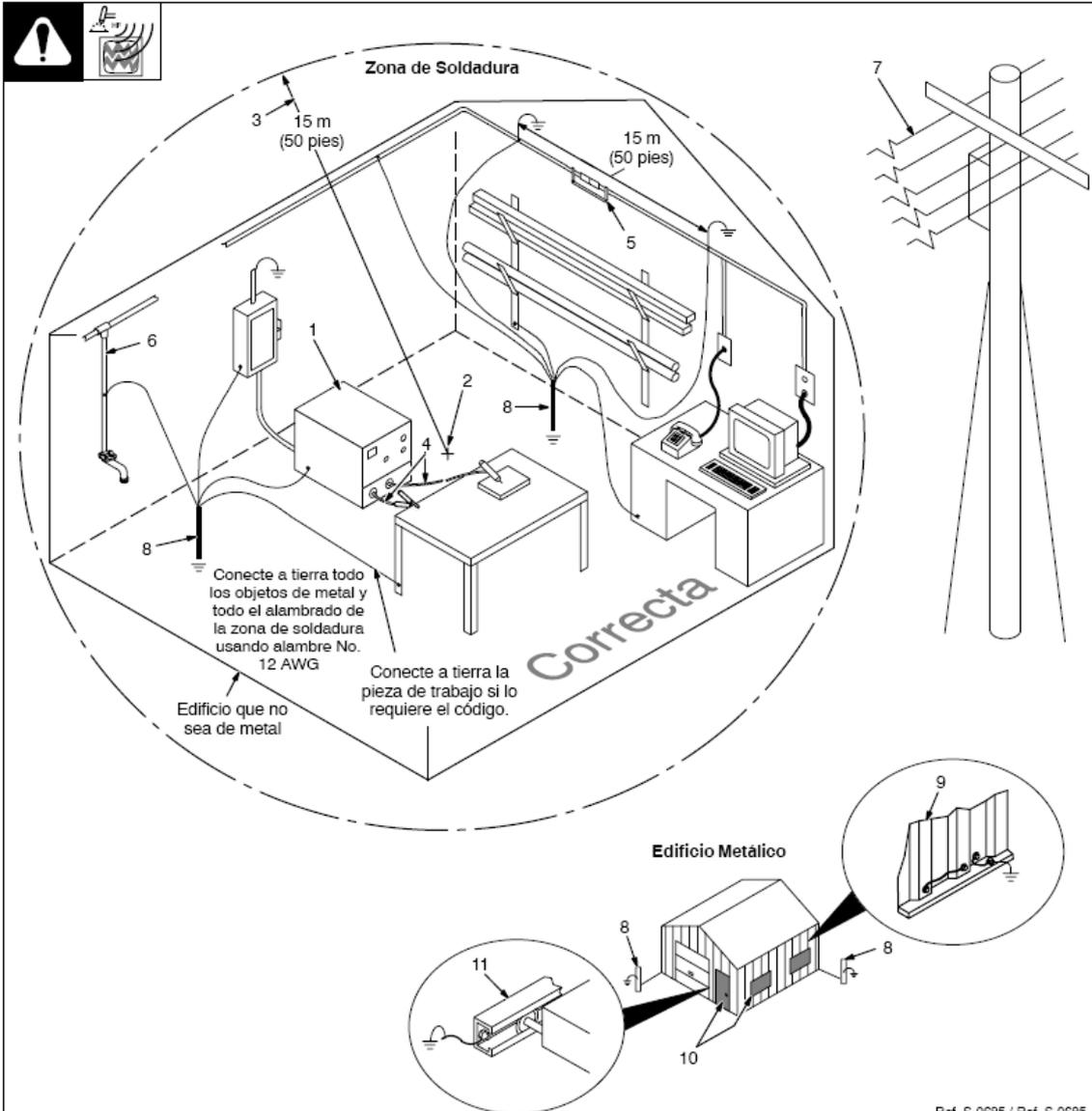


8-2. Instalación incorrecta



A.2 Instalación correcta para eliminar el ruido de la alta frecuencia

8-3. Instalación correcta



- 1 Fuente de Alta Frecuencia (Soldadora con AF integral o unidad de AF separada)

Conecte a tierra el bastidor externo, el terminal de trabajo y el dispositivo de desconexión de la línea al igual que la entrada de corriente y la mesa de trabajo.

- 2 Punto Central de la Zona de Soldadura

Punto medio entre la fuente de alta frecuencia y la antorcha de soldar.

- 3 Zona de Soldadura

Un círculo de 50 pies (15 m) del punto central en todas las direcciones.

- 4 Cables de Salida de Soldadura

Mantenga los cables de un tamaño lo más corto posible y lo más cerca del uno al otro.

- 5 Unión de los Conductos y Conexión a Tierra

Junte eléctricamente todas las secciones de conducto usando trenzas de cobre o alambre trenzado. Conecte el conducto a tierra cada 50 pies (15 m).

- 6 Tubos de Agua y sus Conexiones

Conecte a tierra los tubos de agua cada 50 pies (15 m).

- 7 Cables Eléctricos o Líneas Telefónicas

Ubique el origen de AF por lo menos a una distancia de 50 pies (15 m) de los alambres de potencia y las líneas de teléfono.

- 8 Varilla para Conectar a Tierra

Consulte el Código Nacional Eléctrico para las especificaciones.

Requerimientos para Edificios Metálicos

- 9 Métodos de Conexión de los Paneles de un Edificio Metálico

Atornille o suelde los paneles metálicos el uno al otro instalando trenzas de cobre o alambre trenzado a través de las uniones y luego conecte el armazón a tierra.

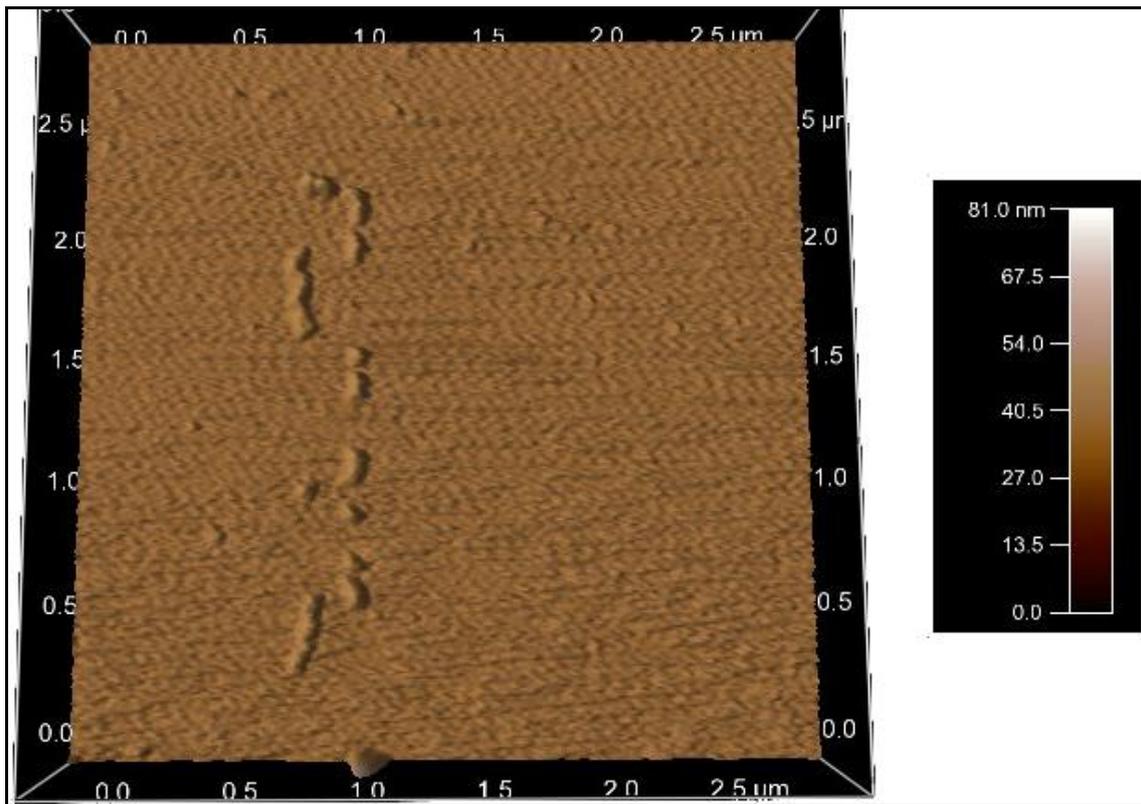
- 10 Ventanas y Aberturas de Puertas

Cubra todas las ventanas y aberturas de puertas con malla de cobre conectada a tierra de un grosor no más grande de 1/4 pulg. (6,4 m).

- 11 Riel para una Puerta Sobre la Cabeza

Conecte esta riel a tierra.

A.3 Nanotubos en un área de 2.5x2.5 μm



A.4 Nanotubos de carbono con forma irregular, aproximadamente de 2,5 μm de largo y menos de 200 nm de grosor

