



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

PROYECTO INTEGRADOR PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
GRADO INGENIERO ELECTRÓNICO

**"SISTEMA DE FILTRADO POR
ELECTROCOAGULACIÓN, CONTROL Y
MONITOREO DE VARIABLES"**

Alumnos: Henn, Santiago Martín y Salas, Federico Nahuel

Director: Dr. Ing. Julian Antonio Pucheta

Córdoba, República Argentina - Julio 2017



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Escuela de Ingeniería Electrónica

El Tribunal Evaluador reunido en éste acto y luego de haber aprobado la Solicitud de Aprobación de Tema y efectuado las distintas instancias de correcciones del Informe del Proyecto Integrador para la obtención del Título de Grado “Ingeniero Electrónico” y cumpliendo con el Reglamento correspondiente, declaran el Informe Final de/l los estudiante/s: **Federico Nahuel Salas** y **Santiago Martín Henn** como “aceptado sin correcciones” y la defensa oral Aprobada. Por lo tanto, luego de haber tenido en cuenta los aspectos de evaluación que indica el Reglamento, el Proyecto Integrador se considera Aprobado.

Se firma el Acta de Examen correspondiente y se distribuyen los ejemplares impresos.

Firma y aclaración del Tribunal Evaluador

Fecha:

NOTA:

Dedico esta tesis a todas las personas que me acompañaron estos años, algunos fueron siempre parte de mi familia, a otros llegue a considerarlos como tal. A mi mamá, mi hermano y mis abuelos. A Natalia, Luciano y sus familias. Sobre todo, le dedico esta tesis a mi papá. Espero poder brillar por todos ellos, por todo lo que supieron iluminar mi camino.

Santiago

Dedico esta tesis en primer lugar a mi familia quienes me proveyeron su apoyo incondicional durante todo el transcurso de la carrera generando condiciones óptimas para desarrollar mis estudios, a mis amigos que estuvieron siempre a mi lado brindando consejos, a mi novia que aportó su cuota de optimismo para resolver los problemas, a los profesores que día a día me transmitieron su pasión por esta profesión y a todos aquellos que formaron parte de este proceso allanando el camino siempre con alegría y buena voluntad.

Federico

Agradecimientos

Agradecemos en primer lugar al Dr. Ing. Julián Pucheta, director de este proyecto integrador, por su constante apoyo hacia el fin de nuestra carrera. A los ingenieros José Amado, Julio Sanchez, Oscar Cáceres y Carlos Liendo, miembros del tribunal evaluador, quienes dedicaron su tiempo para evaluar nuestro proyecto. A Franco Piatti, Sergio Laboret, Juan Lopensino y Ladislao Mathe. A todos nuestros compañeros, quienes en el aula o fuera de ella, nos acompañaron paso a paso en esta etapa que ahora termina. Con todos ellos, estamos eternamente agradecidos.

Declaración

Visto: la Resolución 1030 del año 2010; y Considerando los Anexos del EXP-UNC 23134/2010, referido al Régimen de la Propiedad Intelectual de la Universidad Nacional de Córdoba – UNC; declaramos conocer y aceptarlos en todos sus terminos.

El trabajo aqui presente constituye una disertación original y no ha sido puesta en consideración de forma total o parcial para la obtención de algún otro título de grado o calificación en esta u otra universidad.

Alumnos: Henn, Santiago Martín y Salas, Federico Nahuel

Córdoba, República Argentina - Julio 2017

Resumen

En la actualidad los grandes niveles de contaminación presentados en el agua de muchos países del mundo representa uno de los mayores problemas de la humanidad. La solución a dicho problema aún no es buscada con el empeño que amerita. Si bien existe gran número de sistemas atinentes a disminuir los contaminantes presentes en el líquido de consumo masivo, muchos de ellos suelen ser de elevado costo y difícil aplicación, mas aún considerando la falta de concientización de la sociedad respecto de las consecuencias que conlleva el consumo de agua en malas condiciones. Por tal motivo se plantea el desarrollo de un sistema que permita disminuir la concentración de contaminantes utilizando un método alternativo a los usuales y que a su vez no represente un elevado presupuesto de inversión para poder ser llevado a cabo. El método elegido para cumplir con el cometido está basado en la electrocoagulación y para poder llevarlo a cabo es necesario desarrollar un sistema de filtrado que incluya control y monitoreo de variables. El sistema debe ser capaz de realizar el proceso electroquímico mencionado disminuyendo la densidad de contaminantes, efectuando un control de las variables eléctricas vinculadas y además debe mostrar el avance del proceso al menos desde el punto de vista de la electrónica. La alternativa analizada presenta grandes beneficios debido a su bajo costo de desarrollo, consumo energético despreciable y su posibilidad de aplicación en espacios reducidos.

Área temática y asignaturas

- Área temática: Electrónica Digital.
- Asignaturas: Electrónica Digital III, sistemas de Control I, Síntesis de Redes Activas, Sistemas de Control II, Electrónica Analógica II.

Palabras clave

Electroquímica, Electrolisis, Instrumentación Virtual, Electrofloclación, Anodización.

Abstract

Nowadays, the large levels of pollution present in the water of many countries of the world represents one of the biggest problems of humanity. The solution to this problem is not yet sought with the effort it deserves. Although there are a large number of systems in place to reduce pollutants present in the water for mass consumption, many of them are usually of high cost and difficult to apply, even considering the lack of awareness of society regarding the consequences of consumption Of water in bad conditions. For this reason, we present the development of a system that reduces the concentration of pollutants using an alternative method to the usual ones and that in turn does not represent a high budget of investment to be carried out. The method chosen to fulfill the task is based on electrocoagulation and in order to carry it out it is necessary to develop a filtering system that includes control and monitoring of variables. The system must be able to perform the mentioned electrochemical process by decreasing the density of contaminants, performing the control of the linked electrical variables, and show the progress of the process at least from the point of view of the electronics. The alternative analyzed presents great benefits due to its low development cost, negligible energy consumption and its possibility of application in confined spaces.

Key Words

Electrochemistry, Electrolysis, Virtual Instrumentation, Electroflocculation, Anodization.

Tabla de contenidos

Lista de figuras	xxiii
Lista de tablas	xxix
Lista de símbolos y convenciones	xxxi
1 Introducción	1
1.1 Objetivos	1
1.1.1 Objetivos técnicos	1
1.1.2 Objetivos didácticos	2
1.2 Propósito del proyecto	2
1.2.1 Situación problemática	2
1.2.2 Antecedentes	3
1.2.3 Motivación	4
1.3 Metodología	4
1.3.1 Lugar de realización	4
1.4 Plan del proyecto	5
2 Problemática Ambiental	7
2.1 Contaminación hídrica en la actualidad	8
2.1.1 Principales contaminantes	10
2.1.2 Agua en América	12
2.2 Contaminación hídrica por metales pesados	16

2.2.1	¿Que son los metales pesados?	16
2.2.2	Sus orígenes como contaminantes	16
2.2.3	El Arsénico	17
2.2.4	Regiones afectadas en Argentina	18
2.2.5	Consecuencias	20
3	La Electrocoagulación	25
3.1	¿Que es la Electrocoagulación?	25
3.2	Fundamentos para su uso en la separación de partículas	27
3.2.1	Ventajas de la Electrocoagulación:	27
3.2.2	Desventajas de la Electrocoagulación:	28
3.3	Electro-coagulador con múltiples ánodos de sacrificio y agitador magnético	29
3.4	Antecedentes	31
4	Placa de desarrollo y Software embebido	33
4.1	Placa de desarrollo	33
4.1.1	Periféricos adicionales embebidos	34
4.1.2	Características del Microcontrolador	35
4.2	Sistema operativo	37
4.2.1	Entorno de desarrollo	38
4.3	Puesta en funcionamiento	39
4.4	Desarrollo del software para la placa de desarrollo	39
4.4.1	Convertor Analógico-Digital	39
4.4.2	Comunicación con la plataforma de instrumentación virtual	42
4.4.3	Convertor Digital-Analógico	48
4.4.4	Almacenamiento de datos en tarjeta SD	51
4.4.5	Seguimiento solar	55
5	Instrumentación Virtual	57
5.1	Control y Monitoreo de variables	57

5.1.1	Configuración para comunicación UART - VISA	58
5.1.2	Petición y recepción de datos mediante VISA	58
5.1.3	Calibración del sensor	60
5.1.4	Interpretación de los datos recibidos	60
5.1.5	Presentación de los datos en tiempo real	61
5.1.6	Análisis estadístico de los datos	62
5.1.7	Exportación de los datos	63
5.2	Toma de imágenes	64
5.2.1	Herramientas utilizadas	64
5.2.2	Cámara utilizada	65
5.2.3	Programación para la toma de imágenes	66
5.3	Cálculos para la anodización	67
5.4	Monitoreo de actividad del programa	68
5.5	Manejo de errores	70
5.6	Interfaz de usuario	71
5.6.1	Pestaña "Mediciones"	71
5.6.2	Pestaña "Vídeo"	73
5.6.3	Pestaña "Proceso"	74
5.6.4	Pestaña "Avanzado"	75
5.6.5	Pestaña "Configuración"	76
5.6.6	Pestaña "Log"	77
5.7	Variables	78
5.7.1	Consideraciones preliminares	78
5.7.2	Variables del programa	79
5.8	Funciones y consideraciones adicionales	82
5.8.1	Límites de tensión y consideración dinámica de caída de tensión en el sensor	82
5.8.2	Calibración del Offset	82
5.8.3	Depuración del programa	83

5.8.4	Tiempo de espera para la UART - <i>Timeout</i>	84
5.8.5	UART - <i>Bluetooth</i>	84
5.8.6	Apertura y cierre de la sesión VISA	84
5.8.7	Compilación del video o " <i>timelapse</i> "	85
5.8.8	Programa completo e instructivo de uso	85
5.9	Flujo de ejecución del programa	85
6	Prototipo de cuba electrolítica	89
6.1	Parámetros preliminares	89
6.1.1	Materiales utilizados	89
6.2	Diseño y modelo	92
6.2.1	Construcción	92
6.3	Aspecto	94
6.4	Dimensiones específicas	94
7	Desarrollo del circuito electrónico	97
7.1	Consideraciones preliminares	97
7.2	Acondicionadores de señal	98
7.2.1	Filtro pasa bajas	98
7.2.2	Señal de tensión del sensor de corriente	102
7.2.3	Señal de d.d.p. entre electrodos	107
7.2.4	Señal de tensión para la medición de temperatura	110
7.2.5	Señal de tensión del DAC	110
7.3	Alimentación y regulación de tensión	111
7.4	Actuadores	111
7.4.1	Servomotor	112
7.4.2	Control de tensión de anodización	113
7.4.3	Variable digital auxiliar	121
7.5	Sensores	121
7.5.1	Sensor de corriente	122

7.5.2	Sensor de temperatura	124
7.6	Indicadores	125
7.7	Controles	125
7.7.1	Reset	125
7.7.2	Interruptores	126
7.8	Conectores	127
7.9	Periféricos	127
8	Fuente de alimentación alternativa	129
8.1	Celdas Fotovoltaicas	129
8.1.1	Definición	129
8.1.2	Fabricación	130
8.1.3	Funcionamiento	130
8.2	Administración de la tensión	132
8.2.1	Regulación	132
8.3	Hardware	132
8.3.1	Montura fija	132
8.3.2	Montura guiada	133
8.3.3	Diseño y Construcción	134
8.4	Software	135
8.4.1	Uso de la librería SPA	135
8.4.2	Programa en el sistema embebido	138
8.5	Instalación	143
8.6	Análisis de Costos	144
9	Diseño y construcción del circuito impreso	145
9.1	Consideraciones preliminares de diseño	145
9.1.1	Obtención del circuito de la placa de desarrollo	146
9.1.2	Diagrama de pines (<i>Pin-out</i>)	148
9.2	Esquemático final	149

9.3	Circuito impreso	150
9.3.1	Plano para serigrafía	150
9.3.2	<i>Layout</i>	151
9.4	Aspecto final simulado	151
9.5	Construcción	154
9.6	Componentes y costos	156
9.6.1	Lista de componentes - "BOM" <i>Bill Of Materials</i>	156
9.6.2	Otros materiales necesarios y componentes alternativos	156
9.6.3	Análisis de Costos	157
10	Simulaciones avanzadas, pruebas y resultados	159
10.1	Toma de datos para la corriente de anodización	159
10.1.1	Simulación	159
10.1.2	Pruebas	163
10.2	Control de tensión de anodización	163
10.2.1	Prueba de linealidad a lazo abierto	163
10.2.2	Pruebas a lazo cerrado	166
10.2.3	Modelo del sistema a lazo cerrado	167
10.2.4	Comportamiento discreto	174
10.3	Pruebas del sistema completo	179
10.3.1	Pruebas de toma de imágenes	179
10.3.2	Pruebas de almacenamiento de datos en archivo de texto	180
10.3.3	Transmisión y recepción de datos mediante Bluetooth	181
10.3.4	Instrumentación virtual - impedancia variable	184
10.3.5	Instrumentación virtual - ejecución completa	184
10.3.6	Resultados de pruebas con agua corriente	186
11	Instrucciones de uso	187
11.1	Disposición del dispositivo y consideraciones preliminares	187
11.1.1	Montura guiada para el panel solar	187

11.1.2 Bluetooth	188
11.2 Uso mediante instrumentación virtual	188
11.2.1 Instalación	188
11.2.2 Configuración	188
11.2.3 Utilización	189
11.3 Uso mediante <i>smartphone</i>	190
11.3.1 Instalación	190
11.3.2 Configuración	190
11.3.3 Utilización	191
12 Conclusiones	193
12.1 Resultados obtenidos en base a los objetivos propuestos	193
12.2 Conclusión general	195
12.3 Aporte al campo de la ingeniería	196
12.4 Mejoras a futuro	196
Bibliografía	199
Referencias	201
Anexo 1: Circuito final implementado	205
Anexo 2: Planos del prototipo de cuba electrolítica	207
Anexo 3: Diagrama de bloques de programa - Instrumentación virtual	213
Anexo de Proyecto Integrador 1: Solicitud de Aprobación de Tema	233
Anexo de Proyecto Integrador 2: Informe noviembre	245
Anexo de Proyecto Integrador 3: Informe diciembre	249
Anexo de Proyecto Integrador 4: Informe enero y febrero	255

Anexo de Proyecto Integrador 5: Informe marzo	261
Anexo de Proyecto Integrador 6: Nota de aprobación	267

Lista de figuras

2.1	Muertes por contaminación hídrica.	12
2.2	Concentración de Arsénico en agua y densidad de población en Argentina. .	18
2.3	Concentración de Arsénico en agua y hogares con agua de red en Argentina.	19
3.1	La Coagulación.	26
3.2	La Electrocoagulación.	26
3.3	Celda con agitador magnético y ánodos de sacrificio mono-polares	30
3.4	(a) Configuración de celdas con electrodos en paralelo (b) Configuración de celdas con electrodos di-polares	30
4.1	FRDM-KL46Z.	34
4.2	Periféricos embebidos.	35
4.3	IDE de MBED.	38
4.4	Módulo Bluetooth.	48
4.5	Módulo interfaz SD.	51
4.6	Diagrama de flujo del software embebido en la placa de desarrollo.	56
5.1	Configuración de la comunicación VISA.	58
5.2	Detalle de bloques Read-Write.	59
5.3	Detalle del bloque de interpretación de datos String.	60
5.4	Detalle del bloque de secuencia de gráficos.	61
5.5	Gráfico corriente - tiempo.	61
5.6	Gráfico gramos anodizados - tiempo.	62

5.7	Bloque de análisis estadístico	63
5.8	Bloque de registro de datos en un archivo	64
5.9	Bloque de cronometrado y decisión sobre los fotogramas	65
5.10	Cámaras utilizadas	66
5.11	Rutina de configuración de video/IMAQ.	66
5.12	Rutina para etiquetas de video.	67
5.13	Algoritmo para la aplicación de la ec. de Faraday.	68
5.14	SubVi "LOG" y su contenido.	69
5.15	Ejemplo de entrada en el LOG.	69
5.16	Simple Error Handler.	70
5.17	Manejo de eventos con error y sin error.	71
5.18	Pestaña "Mediciones".	72
5.19	Pestaña "Video".	73
5.20	Pestaña "Proceso".	74
5.21	Pestaña "Avanzado".	75
5.22	Pestaña "Configuraciones".	77
5.23	Pestaña "Log".	78
5.24	Comprobación y ajuste de tensión ingresada.	83
5.25	Bloque de calibración del offset.	83
5.26	Diagrama de flujo del programa en ejecución normal.	86
6.1	Diseño del prototipo de cuba.	93
6.2	Diseño del prototipo de cuba - Detalle.	94
6.3	Aspecto final del prototipo en perspectiva.	95
6.4	Aspecto final del prototipo en vista frontal.	96
7.1	Circuito de filtro pasa bajas.	99
7.2	Respuesta en frecuencia del filtro pasa bajas	100
7.3	Medición del ruido en el sistema	100
7.4	Esquema para la simulación del filtro	101

7.5	simulación para una señal con ruido gaussiano.	101
7.6	Características del Amplificador AD627.	103
7.7	Empaquetado del Amplificador AD627.	104
7.8	Simulación del amplificador operacional.	104
7.9	Circuito completo para la medición de corriente.	107
7.10	Circuito de adaptación para medir la ddp entre electrodos.	108
7.11	Detalle de la tensión de referencia en la placa de desarrollo.	109
7.12	Circuito de adaptación para la señal de temperatura.	110
7.13	Circuito de regulación de tensión.	111
7.14	Servomotor SG90.	112
7.15	Conexión del servomotor SG90.	113
7.16	Circuito de actuación para la tensión de anodización.	114
7.17	Características del transistor IRF110.	118
7.18	Simulación para el transistor IRF110.	119
7.19	Simulación de la tensión de control y la tensión de anodización en el tiempo.	119
7.20	Comparativa de tensiones analíticas y simuladas.	120
7.21	Circuito implementado para la tensión de anodización.	121
7.22	Salida digital auxiliar.	122
7.23	Módulo AC712.	123
7.24	Sensor LM35DZ.	124
7.25	Circuito de reset	126
8.1	Funcionamiento Celda Fotovoltaica.	131
8.2	Comparativa entre monturas de instalación para un panel solar de 5W.	131
8.3	Trayectoria diaria del sol.	133
8.4	Montura ecuatorial.	134
8.5	Montura Ecuatorial, Diseño vs Desarrollo.	136
9.1	Plano de dimensiones de la placa de desarrollo.	146
9.2	Circuito impreso de la placa de desarrollo.	147

9.3	Detalle sobre el circuito impreso de la placa de desarrollo.	147
9.4	Diagrama de pines de la placa de desarrollo.	148
9.5	Circuito impreso terminado.	150
9.6	Figura para impresión.	151
9.7	Figura para impresión (Layout).	152
9.8	Circuito construido - Aspecto final simulado (1).	152
9.9	Circuito construido - Aspecto final simulado (2).	153
9.10	Circuito construido - Aspecto final simulado (3).	153
9.11	Circuito impreso implementado	154
9.12	Aspecto final del circuito implementado.	154
9.13	Aspecto final del circuito implementado (perspectiva).	155
9.14	Detalle del acople entre circuitos.	155
10.1	Simulación completa para mediciones de corriente	160
10.2	Resultado de la simulación para mediciones de corriente	161
10.3	Simulación para mediciones de corriente, detalle	162
10.4	Simulación para mediciones de corriente, límites	162
10.5	Prueba de medición de corriente	163
10.6	Sistema de control - prueba de linealidad a lazo abierto	164
10.7	Medición de la tensión a lazo cerrado - multímetro	166
10.8	Diagrama del sistema de control implementado	167
10.9	Respuesta al escalón de tensión	168
10.10	Respuesta al escalón de tensión - detalle	168
10.11	Respuesta al escalón de tensión simulada	170
10.12	Lugar de raíces para el sistema analizado	171
10.13	Simulación de la respuesta del sistema ante variaciones de ganancia	173
10.14	Pruebas de la respuesta del sistema con distintas ganancias	173
10.15	Step response para $K=30$	174
10.16	Detalle de una señal medida, análisis de tiempo de muestreo	174
10.17	Simulación para sistema discreto $K=0.1$	175

10.18	Respuesta simulada para $K=0.1$	176
10.19	Lugar de raíces para el sistema discreto	177
10.20	Respuestas simuladas para $K=0.05$, $K=0.1$, $K=0.1$	178
10.21	Respuesta simulada para $K \rightarrow 0.2$ (inestabilidad)	178
10.22	Prueba de toma y compilado de imágenes	179
10.23	Prueba de almacenamiento de datos en archivo de texto	180
10.24	Prueba de transmisión/recepción de datos en PC	182
10.25	Prueba de transmisión/recepción de datos en smartphone (1)	183
10.26	Prueba de transmisión/recepción de datos en smartphone (2)	184
10.27	Prueba de instrumentación virtual, a impedancia variable	185
10.28	Log de una ejecución normal	185
10.29	Etapas de la electrocoagulación	186
10.30	Apariencia de los electrodos luego de dos horas de proceso	186
12.1	Diagrama esquemático completo a implementar	206

Lista de tablas

5.1	Protocolo de comunicación	59
5.2	Cámaras utilizadas	65
5.3	Componentes de la pestaña "Mediciones"	72
5.4	Componentes de la pestaña "Vídeo"	73
5.5	Componentes de la pestaña "Proceso"	74
5.6	Componentes de la pestaña "Avanzado"	75
5.7	Componentes de la pestaña "Configuración"	76
5.8	Variables del programa de instrumentación virtual	79
5.9	Variables del programa de instrumentación virtual	80
5.10	Variables del programa de instrumentación virtual	81
7.1	Sensibilidad de los dispositivos AC712	123
7.2	Conectores implementados en el sistema	127
9.1	Pines utilizados en la placa de desarrollo	149
9.2	Lista de componentes utilizados	156
9.3	Costo de los componentes electrónicos	157
10.1	Mediciones para la prueba de linealidad a lazo abierto	165
10.2	Referencias para la figura 10.13	172

Lista de símbolos y convenciones

Símbolos - Nomenclatura

Ω Ohm - Unidad de resistencia

m, u, n, p: prefijos $10^{-3}, 10^{-6}, 10^{-9}, 10^{-12}$ respectivamente

k, M, G: prefijos $10^3, 10^6, 10^9$, respectivamente

Abreviaciones

ddp Diferencia De Potencial

UART Universal Asynchronous Receiver/Transmitter - Transmisor/Receptor Asíncrono
Universal

BT BlueTooth

time-lapse Lapso de Tiempo, utilizado para describir videos conformados por fotogramas
tomados en elevados intervalos de tiempo

USB Universal Serial Bus - Bus en Serie Universal

IMAQ IMage AcQuisition - Herramienta de LabView

CMOS Complementary metal/oxide semiconductor - Semiconductor de complemento met-
al/óxido

DNP Do Not Populate - No colocar (Indica que un componente diseñado no se debe
colocar)

SIV	Sistema de Instrumentación Virtual
CIIC	Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer
CCD	Charged-Coupled Device - dispositivo de carga acoplada
bps	Bits Por Segundo
VCC	Tensión de corriente continua
VI	Virtual Instrument - Instrumento Virtual
VISA	Virtual Instrument Software Architecture - Arquitectura de Software para Instrumentación Virtual
MP	Mega-Píxel
HD	High Definition - Alta Definición
Hz	Hertz
USB	MOSFET - Por sus siglas en inglés: Transistor de Efecto de Campo de Complemento Metal/Óxido
Script	Algoritmo de ejecución automática para un entorno específico
PCB	Printed Circuit Board - Placa de circuito impreso
EC	Electro-Coagulación
LCD	Liquid Crystal Display - Pantalla de cristal líquido
I/O	input/output - entrada/salida
MCU	Micro Controller Unit - Unidad de Micro-Control
LED	Light Emitting Diode - Diodo Emisor de Luz
IDE	Integrated Development Environment - Entorno de Desarrollo Integrado

ADC Analogic to Digital Converter - Conversor Analógico-Digital

DAC Digital to Analogic Converter - Conversor Digital-analógico

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1 Objetivos

Los objetivos del presente proyecto se dividen en técnicos y didácticos. Los primeros refieren al diseño y construcción de un sistema, utilizando conocimientos adquiridos durante el cursado de la carrera de Ingeniería Electrónica, cumpliendo con parámetros previamente establecidos y siguiendo una metodología de trabajo propia de un desarrollo profesional. Los segundos refieren a la adecuación del sistema para su uso aulico o de laboratorio, entendiendo la utilidad del mismo como soporte durante el dictado de materias en las carreras de Ingeniería Química, Ingeniería Electrónica, Ingeniería en Computación, o afines.

1.1.1 Objetivos técnicos

Los objetivos técnicos consisten en: Obtener un sistema de electrocoagulación para un determinado volumen de agua, que permita disminuir la concentración de contaminantes, medir las variables del sistema y controlar el mismo para lograr la coagulación de elementos suspendidos en la solución. Los límites de estabilidad y error del sistema deben ser conocidos y estar dentro de rangos aceptables. Además, debe ser posible tomar muestras en el seno de la solución, ya que esto facilita el trabajo en caso de realizar un análisis de laboratorio.

1.1.2 Objetivos didácticos

Los objetivos didácticos consisten en: Lograr una interfaz de usuario sencilla y fácil de comprender, que permita el control y monitoreo de variables en tiempo real en dispositivos inteligentes de uso cotidiano, como "smartphones" y computadoras. Además debe permitir el análisis posterior de los datos en planillas de calculo o a través de cualquier algoritmo que analice datos en formato ASCII. El prototipo construido deberá ser robusto y fácil de utilizar, de modo que sea posible su uso como soporte práctico, por ejemplo para lecciones de sistemas de control, electrónica digital o química aplicada.

1.2 Propósito del proyecto

1.2.1 Situación problemática

Las tecnologías para filtrado de sustancias de uso más generalizado, están basadas en sistemas mecánicos y/o químicos, los cuales cuentan con alguna o varias de las siguientes desventajas:

- El uso de materiales descartables, como polímeros contaminantes.
- La inutilización de un porcentaje elevado de la sustancia a filtrar, debido a la superconcentración de materiales en suspensión.
- Elevado consumo energético.
- Dificultad en la implementación.
- Elevado costo.

Entre los sistemas de filtrado más utilizados se pueden mencionar:

- Filtros de bloque de carbono (comprimido y prensado).
- Filtro de carbono activo granulado.
- Destilación.

- Sistema de ósmosis inversa.
- Descalcificación.
- Radiación.

Se concluyó que existe la necesidad de investigar nuevos sistemas que permitan optimizar y controlar los procesos de filtrado, en su mayoría sistemas a lazo abierto de pobre eficiencia. Roxanne Johnson [10], Custodio [3]. Una de las aplicaciones de mayor impacto para los sistemas de filtrado, es la purificación de agua para consumo humano. La problemática en este caso es de alcance global, y constituye una prioridad en la mayoría de los países desarrollados sin recibir la suficiente atención en aquellos países en vías de desarrollo, como es el caso de la Argentina. Robert Martin [9], Puliafito [8].

Mencionamos además la necesidad de un sistema didáctico para explicar mediante una experiencia práctica los procesos de electrocoagulación en laboratorios y/o clases prácticas. Esta necesidad fue puesta en consideración por parte del plantel docente de Ingeniería Química en la casa de estudios donde se realiza este proyecto, y los autores consideramos válida la posibilidad de enriquecer este proyecto integrador proponiendo esta posibilidad de uso como objetivo.

1.2.2 Antecedentes

Actualmente los sistemas de filtro basados en electricidad se dividen en dos grandes grupos: electrocoagulación y electrodeionización. Existen antecedentes de uso a nivel mundial, pero no hay aplicaciones dentro de la Argentina actualmente disponibles en el mercado. Los sistemas comercializados internacionalmente son de elevado costo y con un perfil orientado a nichos. IONPURE [5], Yousuf [14].

No existen antecedentes en nuestra casa de estudios de desarrollos similares en proyectos integradores, o tesinas de grado, ni tampoco existen antecedentes en el laboratorio donde se desarrollará el dispositivo.

1.2.3 Motivación

Además de perseguir el título de grado para el cual nace este proyecto integrador, existe una fuerte motivación social para este desarrollo. Nos encontramos con una problemática muy importante en la Argentina respecto a la contaminación hídrica; actividades como la megaminería, el continuo desmonte y la falta de una red de agua potable en sectores aislados (sobre todo aquellos de bajos recursos) vuelven de crucial importancia para la salud humana el poder contar con un sistema de potabilización de agua de las características del que aquí se plantea. Esto último, y poder desarrollar un dispositivo innovador que pueda asistir a futuros estudiantes o investigadores en nuestra casa de estudios, constituyen en conjunto las motivaciones principales de este proyecto.

1.3 Metodología

El método de desarrollo que se utilizó fue de modelo en cascada, fuertemente nutrido de un constante prototipado y la mejora continua. Las etapas del mismo estuvieron claramente definidas, y el prototipado en cada etapa permitió modularizar el problema, por lo que fue posible cumplir los objetivos del proyecto de manera gradual sin afectar etapas más tempranas, hasta que se lograron los objetivos globales. Se puso especial énfasis en la abstracción de cada problema, lo que volvió mucho más fáciles las pruebas y facilitará mejoras a futuro.

1.3.1 Lugar de realización

Este proyecto se realizó en el Laboratorio de Investigación Matemática Aplicada a Control (LIMAC) ¹.

El Laboratorio de Investigación Matemática Aplicada a Control (LIMAC) tiene como área de investigación a la matemática con el fin de generar herramientas destinadas a la Agricultura, como así también realizar la formación de estudiantes de grado y postgrado en

¹<http://www.inv.limac.efn.uncor.edu/>

el ámbito de las Ciencias de la Ingeniería de Control Automático. La misión del LIMAC es la de generar métodos, tecnología, información y modelado de sistemas para la producción agropecuaria con el fin de satisfacer las necesidades del sector como disminuir costos operativos, riesgos de producción, riesgos de comercialización y maximizar la calidad del producto. Se ofrece asesoramiento basado en conocimiento para mejorar los rendimientos a través de métodos científicos con datos macroscópicos y microscópicos a los cuales se aplican algoritmos matemáticos que afianzan la toma de decisiones. Este laboratorio forma parte de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.

1.4 Plan del proyecto

El proyecto consiste en el desarrollo de un sistema que permita, a través del monitoreo y control de variables específicas (temperatura, presión, tensión, corriente y toma de imágenes por CCD) realizar el proceso de electrocoagulación de partículas de una solución, además debe recolectar los datos necesarios para validar un modelo matemático del mismo. Dicho sistema tendrá como objetivo superar pruebas de laboratorio y de campo con la mayor efectividad posible. Paralelamente se desarrollará un sistema de similares características, con un enfoque en la interfaz de usuario y con facilidad de aplicación. Se pretendió que cada una de las características integradas pueda funcionar de manera autónoma, con energía solar (celdas fotovoltaicas).

En las primeras etapas se realizará una investigación tanto teórica como así también una relacionada a las posibilidades de aplicación, prestando especial atención a la disponibilidad y costo de las partes que compondrían el sistema, a nivel mundial. Luego se abordará el diseño y desarrollo de una interfaz de instrumentación virtual que permita el análisis de datos y el control del sistema mediante una computadora convencional. Se desarrollará y construirá un sistema de alimentación a base de celdas fotovoltaicas y a continuación se avanzará en el diseño de un sistema autónomo basado en una plataforma embebida, que permita la toma y almacenamiento de datos, así como el control del sistema de manera autónoma.

Habiendo resuelto los sistemas electrónicos, se procederá al diseño y construcción de un prototipo de hardware, que permita a personal idóneo realizar pruebas de campo y de laboratorio con relativa facilidad, enfocándose en una inmediata mejora que permita a personal no calificado montar y utilizar el sistema.

En una última etapa se realizarán pruebas del sistema, y se analizarán los datos obtenidos hasta el momento, para obtener conclusiones en base a los objetivos propuestos. Además se evaluarán las perspectivas de uso en sitios que se encuentren en emergencia por contaminación hídrica.

Adelantándose al planteo de las posibilidades de desarrollo a futuro, se evaluarán las perspectivas de uso para la separación molecular del agua. Dadas las condiciones necesarias de tensión, presión, temperatura, y materiales, se puede obtener Hidrógeno y Oxígeno, que en una correcta proporción constituyen una mezcla combustible que podría ser de gran utilidad para una gran cantidad de aplicaciones. La bibliografía utilizada se podrá consultar al final de este informe.

CAPÍTULO 2

Problemática Ambiental

El presente capítulo introduce al lector acerca de la problemática ambiental que motiva este proyecto, y brinda un *marco teórico* para comprender la magnitud del tema abordado.

Todas y cada una de las personas del planeta, en mayor o menor medida, se encuentran afectadas por la contaminación del agua, la cual es un factor fundamental para el ser humano, tanto para su consumo de manera directa, como así también para la obtención de alimentos y productos que se utilizan cotidianamente. Desde ya hace muchos años, sobre todo con el avance de la industria como factor económico fundamental en el progreso del hombre, se utiliza una cantidad enorme de este recurso. La utilización del agua como materia prima tiene un costo muy elevado, económico y ambiental.

Existen gran cantidad de elementos que al ser mezclados con el agua acarrear la contaminación de la misma, con todas las consecuencias que ello trae aparejado. En muchos casos las personas evalúan el nivel de potabilidad de ésta considerando tan solo factores poco determinantes como la transparencia y el olor, si bien estos factores son una condición necesaria para considerar la potabilidad, no son suficientes para ello. Se deben tener en cuenta varias características para determinar que una cantidad determinada de agua es apta para consumo, y muchas de ellas no son apreciables por los sentidos humanos. La potabilidad del agua debe ser demostrada a través de exámenes de laboratorio y en muchas ocasiones las

características químicas de la misma están vinculadas con contaminantes que representan una problemática a largo plazo. Sin embargo en la gran mayoría de los casos las personas aún siendo conscientes del grado de contaminación presentado en el agua se ven obligados a consumirla al no tener alternativas al respecto, debido a la ausencia de una fuente de agua potable, lo que pone en evidencia la problemática social ya mencionada.

Uno de los factores determinantes de la preocupación a nivel mundial respecto a la contaminación hídrica es la presencia de Arsénico (El cual se encuentra presente en napas a lo largo de la República Argentina), y otros metales pesados en caudales de agua que son regularmente utilizados para industria pesada como minería o agro-químicos. La extracción de los metales (en forma de iones) contaminantes, fue una de las motivaciones sobre la cual este proyecto comenzó a formularse.

2.1 Contaminación hídrica en la actualidad

**Datos y cifras de extraídos de UNICEF y la Organización Mundial de la Salud*

- La escasez de agua potable y de saneamiento es la causa principal de enfermedades en el mundo.
- La mortandad en la población infantil es bastante elevada. Unos 4.500 niños y niñas mueren a diario por carecer de agua potable y de instalaciones básicas de saneamiento. Muchos otros padecen mala salud, su rendimiento se ha visto disminuido y han perdido la oportunidad de recibir una educación.
- Los jóvenes y los ancianos son los más vulnerables. En los países en vías de desarrollo, más del 90% de las muertes por diarrea a causa de agua no potable y la falta de higiene se producen en niños y niñas menores de cinco años.
- Las enfermedades causadas por el agua impiden que los niños y niñas vayan a la escuela. A través de un estudio sobre estudiantes de Jamaica de entre 9 y 12 años se logró observar que los niños y niñas que sufrían trichuriasis (enfermedad transmitida por el agua) asistían a clase la mitad de veces que sus compañeros/as que no estaban

infectados/as, y en los casos donde las escuelas carecían de letrinas, las niñas con frecuencia no iban a clase.

- Para el año 2025, se estima que 817 millones de personas no contarán con suficiente agua.
- Los pobres son los mayores afectados. Un niño o niña que nazca en Europa o en los Estados Unidos tiene 520 probabilidades menos de morir por diarrea que un menor de edad de África subsahariana.
- Las mujeres y las niñas son las “transportadoras de agua” del mundo. En promedio, las mujeres y niñas de los países en vías de desarrollo caminan 6 kilómetros al día, transportando 20 litros de agua, lo que reduce de manera considerable el tiempo que podrían utilizar para otro trabajo productivo o para que, en el caso de las niñas, asistan a la escuela.
- En 1998, 28 países experimentaron tensión o escasez hídrica. Se prevé que esta cifra aumente a 56 para el año 2025.

2.1.1 Principales contaminantes

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el agua está contaminada cuando su composición se haya alterado de modo que no reúna las condiciones necesarias para ser utilizada en el consumo del hombre y de los animales. En los cursos de agua, los microorganismos encargados de la descomposición mantienen siempre igual el nivel de concentración de las diferentes sustancias que puedan estar disueltas en el medio, este proceso se denomina "auto depuración del agua". Cuando la cantidad de contaminantes es excesiva, la auto depuración resulta imposible.

Las principales fuentes contaminantes del agua son:

- Vertimiento de desechos tóxicos provenientes de procesos mineros también llamados "relaves". Esta forma de contaminación de las aguas es muy común y los responsables son los centros mineros y las concentradoras. Los relaves mineros contienen Arsénico, Hierro, Cobre, Zinc, Mercurio, Plomo y otras sustancias sumamente tóxicas para las plantas, los animales y el ser humano. Por otro lado también se encuentran los lavaderos de oro, por el vertimiento de Mercurio en las aguas de ríos y quebradas.
- Sustancias radioactivas procedentes de los residuos producidos por la minería y el refinado del Uranio y el Torio, las centrales nucleares y el uso industrial, médico y científico de materiales radiactivos.
- Vertimiento de productos químicos y desechos industriales. Consiste en la deposición de productos diversos (abonos, petróleo, aceites, ácidos, soda, aguas de formación o profundas, etc.) provenientes de las actividades industriales.
- Vertimiento de aguas servidas. La mayor parte de los centros urbanos vierten directamente los desagües (aguas negras o servidas) a los ríos, a los lagos y al mar. Los desagües contienen excrementos, detergentes, residuos industriales, petróleo, aceites y otras sustancias que son tóxicas para las plantas y los animales acuáticos. Con el vertimiento de desagües, sin previo tratamiento, se dispersan agentes productores de enfermedades (bacterias, virus, hongos, huevos de parásitos, amebas, etc.).

- Vertimiento de basuras y desmontes en las aguas. Es costumbre generalizada en el país el vertimiento de basuras y desmontes en las orillas del mar, los ríos y los lagos, sin ningún cuidado y en forma absolutamente desordenada. Este problema se produce especialmente cerca de las ciudades e industrias. La basura contiene plásticos, vidrios, latas y restos orgánicos, que o no se descomponen o al descomponerse producen sustancias tóxicas de impacto negativo.
- Aguas residuales que demandan oxígeno (en su mayor parte materia orgánica, cuya descomposición produce la desoxigenación del agua).
- Nutrientes vegetales que pueden estimular el crecimiento de las plantas acuáticas. Éstas, a su vez, interfieren con los usos a los que se destina el agua y, al descomponerse, agotan el oxígeno disuelto y producen olores desagradables.
- Petróleo, especialmente el procedente de los vertidos accidentales.
- Minerales inorgánicos y compuestos químicos.
- Sedimentos formados por partículas del suelo y minerales arrastrados por las tormentas desde las tierras de cultivo, los suelos sin protección (cobertura vegetal), las explotaciones mineras, las carreteras y los derribos urbanos.
- El calor también puede ser considerado un contaminante cuando el vertido del agua empleada para la refrigeración de las fábricas y las centrales energéticas hace subir la temperatura del agua de la que se abastecen.

Es posible notar que las fuentes de contaminación hídrica son muy diversas y en muchos casos difícilmente pueden ser eliminadas.

En la figura 2.1 es posible apreciar de manera gráfica las consecuencias fatales resultantes del poco interés del ser humano por el cuidado del agua.

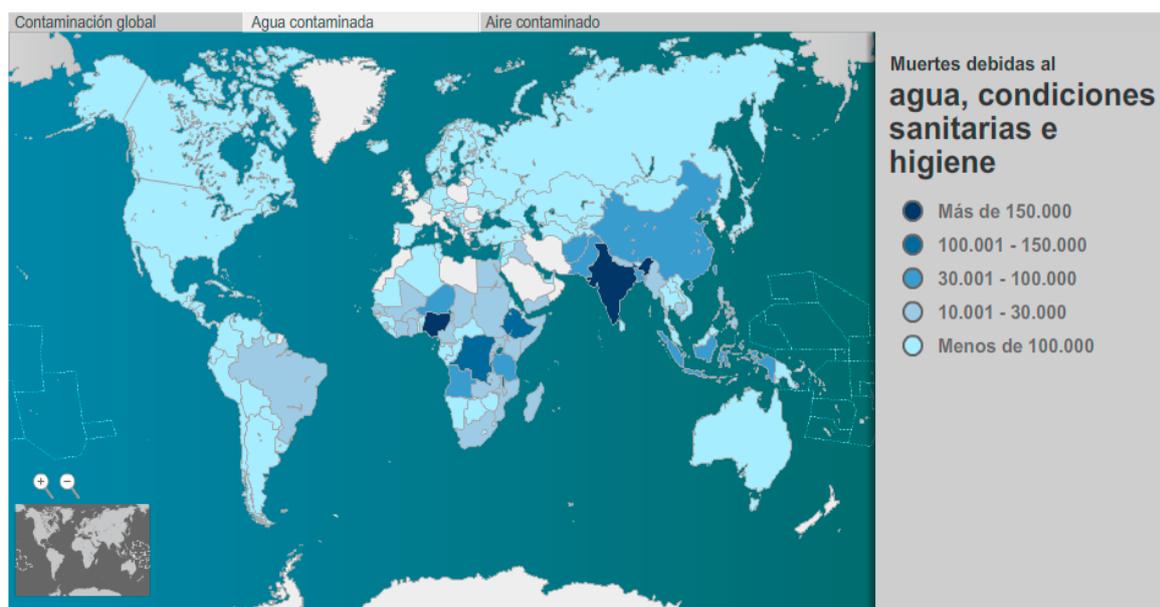


Fig. 2.1 Muertes por contaminación hídrica.

2.1.2 Agua en América

Más del 46% de los recursos hídricos del mundo se encuentra en el continente americano. Brasil alberga 20% del recurso hídrico mundial en la cuenca del Amazonas, mientras que en Sudamérica están cuatro de los 25 ríos más caudalosos del mundo: Amazonas, Paraná, Orinoco y Magdalena. A esto se agrega la existencia de grandes lagos como el Maracaibo en Venezuela, el Lago Cocibolca en Nicaragua, el Titicaca compartido por Perú y Bolivia, el Poopó en Bolivia, y el Buenos Aires compartido por Chile y Argentina. Con esta riqueza hídrica, la disponibilidad de agua per cápita en América Latina debería ser algo menor a los 3100 [m³] por persona al año, superior a la de cualquier otra región de la Tierra.

En América Latina se padecen serios problemas derivados del acceso al agua:

77 millones de habitantes (26 millones en zonas urbanas y 51 millones en zonas rurales) en América Latina y el Caribe carecen de acceso adecuado al agua potable. Más de 130 millones de personas en América Latina (37 millones en regiones urbanas y 66 millones en regiones rurales) carecen de saneamiento en sus hogares. Menos de 14% de las aguas residuales se procesa en plantas de tratamiento, el resto se descarga al ambiente sin tratamiento alguno.

Situación en Argentina

El principal problema que afecta al uso de las aguas dulces en Argentina, proviene de los procesos de contaminación a que están sometidas sus fuentes, los que obedecen a distintas causas y orígenes, siendo los más habituales:

- **Origen industrial:** los vertidos de este origen constituyen la principal fuente de contaminación de las aguas. La mayoría de las industrias utilizan el agua en cantidades variables en diferentes procesos de fabricación. Las principales industrias contaminantes son las siderúrgicas, curtiembres, frigoríficos, petroquímicas y celulósicas. Aportan, predominantemente, metales pesados como Arsénico, Cadmio, Cromo, Plomo, Cobre, Hierro, Mercurio, Aluminio, Selenio, etc. La concentración poblacional e industrial que se registra en el tramo litoral de casi 400[km] que va desde las inmediaciones de la ciudad de Rosario a la ciudad de La Plata, motiva los altos niveles de vuelco que se registran en los correspondientes trayectos de los cursos de los ríos Paraná y de la Plata. Si bien los amplios caudales de ambos ríos moderan los efectos, en los sectores inmediatos a los vuelcos se registran niveles de contaminación de alta criticidad.
- **Origen urbano:** vuelco de aguas que contienen los residuos colectivos de la vida diaria a cursos superficiales, sin tratamiento previo. Este problema es generalizado en todas las ciudades argentinas. También se registra contaminación de napas subterráneas por efecto de la filtración de pozos negros que reciben líquidos cloacales no depurados.
- **Origen agrícola:** proviene principalmente de ciertos productos utilizados en agricultura (herbicidas, fungicidas y fertilizantes nitrogenados) y de residuos de origen animal. Entre las sustancias contaminantes aportadas se encuentran los plaguicidas clorados y fosforados, solventes clorados, dioxinas, nitritos, nitratos y fosfatos, principal responsable del proceso de eutrofización de muchos lagos. A su vez, la explotación intensiva de los acuíferos Puelche y Pampeano dado que son fácilmente asequeables para su utilización en riego complementario, ha determinado la generación de importantes niveles de contaminación en este recurso subterráneo.

- **Origen minero:** tanto por operaciones normales no siempre bien supervisadas y monitoreadas, como por accidentes eventuales, las actividades mineras suelen ser origen de contaminación. En la provincia de Santa Cruz, la industria minera de Río Turbio descarga gran cantidad de sólidos que se generan en el tratamiento del carbón mineral en el Río Gallegos, afectando la vida acuática y la disponibilidad del agua para uso humano. La extracción de calizas (Región Pampeana), la extracción petrolera (Noroeste) y la extracción petrolera y de uranio (Cuyo), también son causa de contaminación de fuentes de agua superficiales y subterráneas. La minería de metales como el oro y la plata están siendo una actividad relevante en el uso de agua, particularmente en zonas donde el recurso es escaso y compite con sus otros usos tradicionales.

El Drenaje Ácido de la Minería (DAM) es el mayor problema ambiental provocado por la industria minera y es también su mayor pasivo, especialmente para nuestras corrientes de agua. Una mina generadora de ácido tiene el potencial para causar un impacto devastador a largo plazo en los ríos, arroyos y vida acuática, volviéndose en efecto, una "máquina de contaminación perpetua". Existen cuatro tipos importantes de impactos mineros en cuanto a calidad de agua:

- *Drenaje ácido de la minería (DAM):* cuando las grandes cantidades de roca que contienen minerales sulfatados, son excavadas en tajo abierto o en vetas en minas subterráneas, estos materiales reaccionan con el aire o con el agua para crear ácido sulfúrico. Cuando el agua alcanza cierto nivel de acidez, un tipo de bacteria común llamada "Tiobacilus Ferroxidante" puede aparecer acelerando los procesos de oxidación y acidificación, lixiviando ¹ aun más los residuos de metales de desecho. El ácido lixiviará la roca mientras que la roca fuente este expuesta al aire y al agua. Este proceso continuará hasta que los sulfatos sean extraídos completamente; este es un proceso que puede durar cientos, o quizás miles de años. El ácido es transportado desde la mina por el agua, las lluvias o por corrientes superficiales, y posteriormente depositado en los estanques de agua,

¹Lixiviación: Extracción de la materia soluble de una mezcla mediante la acción de un disolvente líquido.

arroyos, ríos, lagos y mantos acuíferos cercanos. El DAM degrada severamente la calidad del agua y puede aniquilar la vida acuática, así como volver el agua prácticamente inservible.

- *Metales pesados y lixiviación*: la contaminación por metales pesados es causada cuando algunos metales como el Arsénico, el Cobalto, el Cobre, el Cadmio, el Plomo, la Plata y el Zinc, contenidos en las rocas excavadas o expuestos en vetas en una mina subterránea, entran en contacto con el agua. Los metales son extraídos y llevados río abajo, mientras el agua lava la superficie rocosa. Aunque los metales pueden ser movidos en condiciones de pH² neutral, la lixiviación es particularmente acelerada en condiciones de pH bajo, tales como las creadas por el drenaje ácido de la minería.
- *Contaminación química*: cuando algunos agentes químicos (tales como el Cianuro y el Ácido Sulfúrico, utilizados por compañías mineras para la separación del material deseado, del mineral en bruto) se derraman, gotean, o se trasladan del sitio minero a un cuerpo de agua cercano. Estos químicos pueden ser también altamente tóxicos para los humanos y la fauna.
- *Las escombreras*: una vez que los minerales han sido procesados y recuperados, la roca sobrante se vuelve otra forma de desperdicio minero que se ubican en las escombreras. Las escombreras contienen los mismos metales pesados tóxicos y formaciones de ácido mineral que produce el desecho de roca. También pueden contener agentes químicos usados para el procesamiento del mineral en bruto, tales como Cianuro o Ácido Sulfúrico. Las escombreras son usualmente colocadas en la superficie, en áreas de contención o en lagunas de oxidación, y en un número creciente de operaciones bajo tierra, donde el desecho es usado como relleno para las áreas que fueron excavadas. Si son asegurados inapropiadamente, los contaminantes de los desechos mineros pueden lixiviar hacia la superficie o a los mantos de agua subterránea causando una contaminación seria que puede perdurar durante muchas generaciones.

²pH: Coeficiente que indica el grado de acidez o basicidad de una solución acuosa.

2.2 Contaminación hídrica por metales pesados

2.2.1 ¿Que son los metales pesados?

El término de "metal pesado" refiere a cualquier elemento químico metálico que tenga un alta densidad relativa (su densidad es por lo menos cinco veces mayor que la del agua) y sea tóxico o venenoso aun en concentraciones bajas. Tienen aplicación directa en numerosos procesos de producción de bienes y servicios. Los metales pesados son componentes naturales de la corteza de tierra, no pueden ser degradados o ser destruidos. En un grado pequeño se incorporan a nuestros cuerpos ya sea mediante los alimentos y agua que consumimos y/o el aire que respiramos. Algunos de ellos (Cobre, Selenio, Cinc) son esenciales para mantener el metabolismo del cuerpo humano, sin embargo, en concentraciones más altas pueden conducir al envenenamiento.

2.2.2 Sus orígenes como contaminantes

Las aguas contienen metales disueltos de forma natural. Pero además, pueden incorporar metales provenientes de los materiales que usa el hombre. El uso de los metales está íntimamente asociado al desarrollo de la civilización.

A continuación de la Edad de Piedra en la cual el hombre creaba sus herramientas a base de materiales como el Sílex, Cuarzo, Cuarcita, Obsidiana, etc, existió la Edad de Cobre en la cual comenzó el desarrollo de la minería de ese metal y por consiguiente las primeras apariciones del mismo como factor contaminante de las fuentes hídricas naturales.

Con la Edad de Bronce comienza el uso de aleaciones, y en particular una que puede llamar la atención en la actualidad: el llamado "Bronce Arsenical", que no es otra cosa que cobre con una cantidad modesta (unos pocos por ciento) de Arsénico. Probablemente esta aleación se obtuvo al procesar, para obtener Cobre, sulfuros que contenían Arsénico. Algunas de las propiedades mecánicas de la aleación impulsaron su uso.

Luego siguió la Edad de Hierro. El Hierro tiene propiedades mecánicas (dureza) inferiores al Bronce, pero la destrucción de las rutas de comercio hizo poco viable la producción de

Bronce. El Hierro es más abundante, no necesita aleantes, y reemplazó en gran medida al Bronce.

El desarrollo de la metalurgia de otros metales por supuesto continuó en forma activa. En la actualidad, el listado de elementos químicos usados por el hombre incluye prácticamente todos los de la Tabla Periódica. Desde el punto de vista del impacto ambiental, y en particular de la posibilidad de contaminación del agua, es importante tanto el volumen de producción y uso como las propiedades toxicológicas y ecotoxicológicas.

2.2.3 El Arsénico

El Arsénico (As) es un elemento químico que se encuentra distribuido ampliamente en la naturaleza, en realidad es un semi metal o metaloide. Es uno de los 22 elementos conocidos que se componen de un solo nucleido estable. Puede ser hallado de forma natural como mineral de Cobalto, aunque por lo general está en la superficie de las rocas combinado con Azufre o metales como Hierro, Manganeso, Cobalto, Níquel, Plata o Estaño. En su forma elemental tiene pocos usos. Es uno de los pocos minerales disponibles con un 99.9999+ % de pureza. En el estado sólido se ha empleado ampliamente en los materiales láser GaAs (Arseniuro de Galio) y como agente acelerador en la manufactura de varios aparatos. El Óxido de Arsénico se utiliza en la elaboración de vidrio. Los Sulfuros de Arsénico se usan como pigmentos y en juegos pirotécnicos. El Arseniato de Hidrógeno se emplea en medicina, así como otros compuestos de arsénico. La mayor parte de la aplicación medicinal de los compuestos de arsénico se basa en su naturaleza tóxica.

2.2.4 Regiones afectadas en Argentina

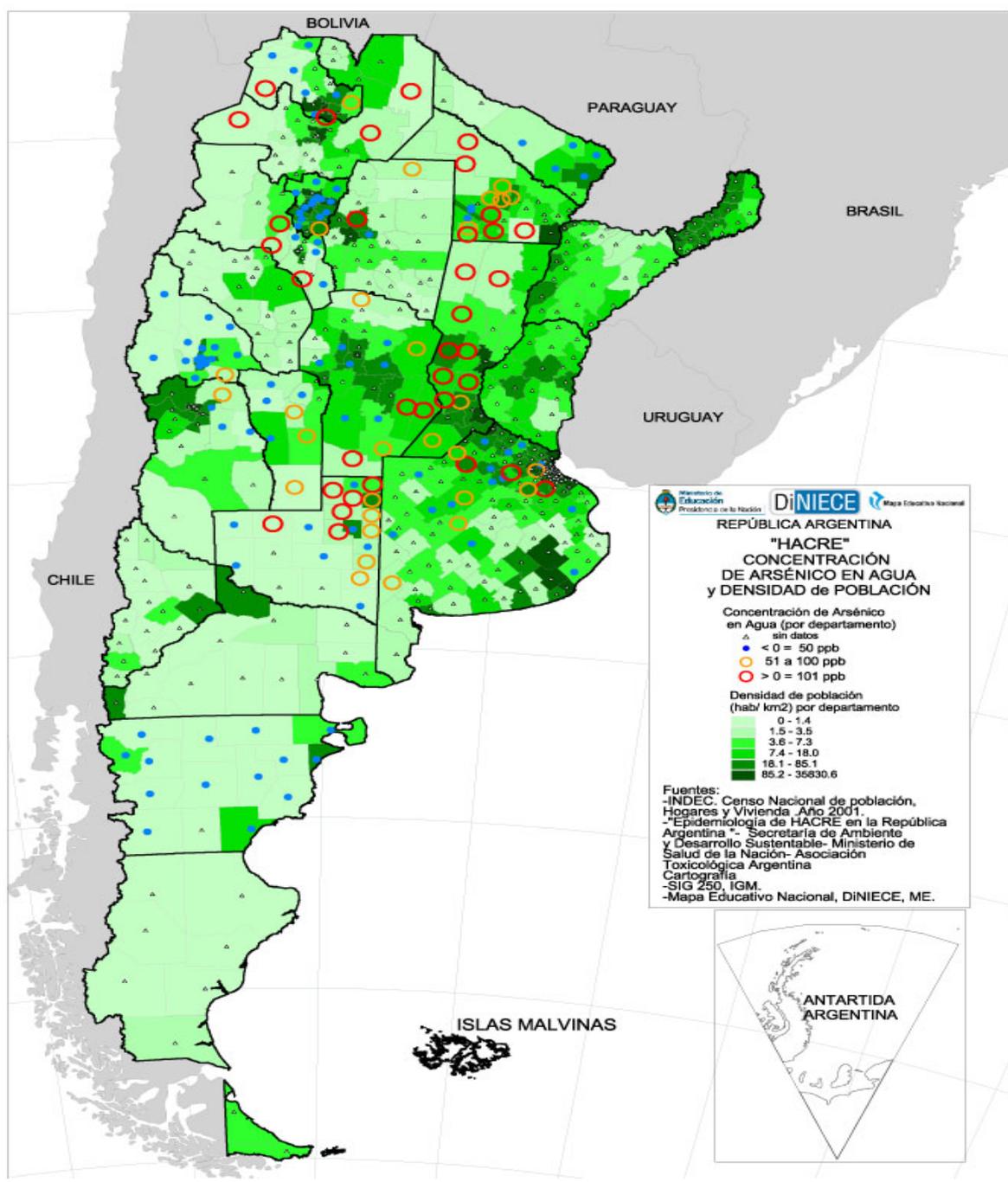


Fig. 2.2 Concentración de Arsénico en agua y densidad de población en Argentina.

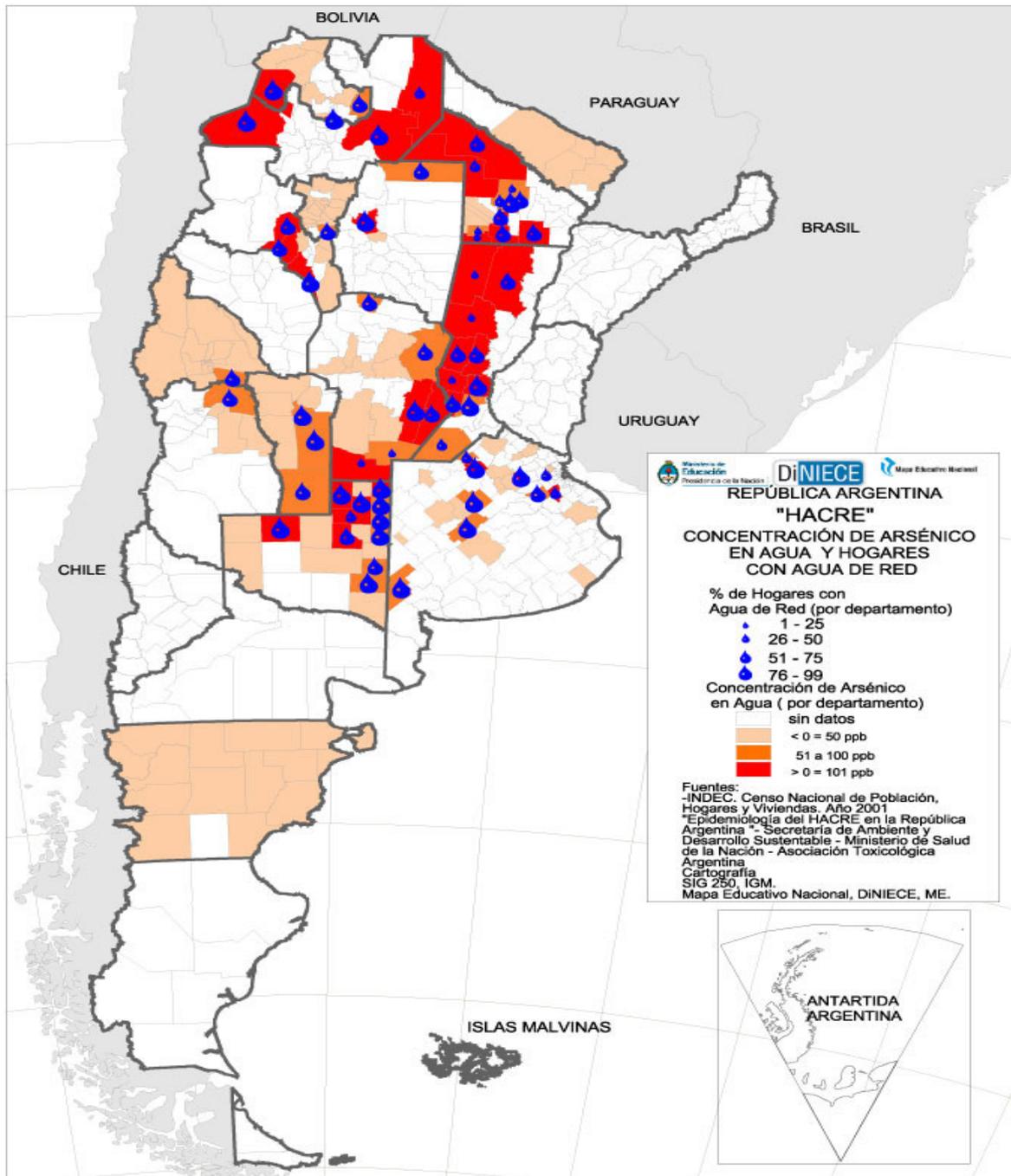


Fig. 2.3 Concentración de Arsénico en agua y hogares con agua de red en Argentina.

2.2.5 Consecuencias

Como fue mencionado previamente los seres humanos han usado los metales desde los principios de las civilizaciones más primitivas. Muchas veces ello ha llevado a incorporar en sus organismos dichos elementos contaminantes por diferentes vías, entre ellas la vía oral a través del consumo de agua. Se procede entonces a describir los efectos toxicológicos de una serie de metales: Arsénico (As), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Cadmio (Cd), Mercurio (Hg) y Plomo (Pb). Se describirán brevemente las fuentes de exposición a estos metales, las posibles vías de ingreso al organismo, sus efectos nocivos para la salud y el tratamiento correspondiente para disminuir sus efectos sobre la persona intoxicada. Se mencionarán además los valores guía establecidos por la Organización Mundial de Salud (OMS) como valores máximos aceptables de concentración en el agua de consumo humano.

Arsénico (As)

- **Fuentes de exposición:** el Arsénico es un elemento natural de la corteza terrestre; ampliamente distribuido en todo el medio ambiente, está presente en el aire, el agua y la tierra. En su forma inorgánica es muy tóxico. La exposición a altos niveles de Arsénico inorgánico puede deberse a diversas causas, como el consumo de agua contaminada o su uso para la preparación de comidas, para el riego de cultivos alimentarios y para procesos industriales, así como al consumo de tabaco y de alimentos contaminados.
- **Vía de ingreso del As:** oral, respiratoria y cutánea.
- **Manifestaciones clínicas:** los síntomas inmediatos de intoxicación aguda por Arsénico incluyen vómitos, dolor abdominal y diarrea. Seguidamente, aparecen otros efectos, como entumecimiento u hormigueo en las manos y los pies o calambres musculares y, en casos extremos, la muerte. Los primeros síntomas de la exposición prolongada a altos niveles de Arsénico inorgánico (por ejemplo, a través del consumo de agua y alimentos contaminados) se observan generalmente en la piel e incluyen cambios de pigmentación, lesiones cutáneas, durezas y callosidades en las palmas de las manos y las plantas de los pies. Estos efectos se producen tras una exposición

mínima de aproximadamente cinco años y pueden ser precursores de cáncer de piel. Además de cáncer de piel, la exposición prolongada al Arsénico también puede causar cáncer de vejiga y de pulmón. El Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (CIIC) ha clasificado el Arsénico y los compuestos de Arsénico como cancerígenos para los seres humanos; el Arsénico presente en el agua de bebida también ha sido incluido en esa categoría por el CIIC.

Entre los demás efectos perjudiciales para la salud que se pueden asociar a la ingesta prolongada de Arsénico destacan los que siguen: problemas relacionados con el desarrollo, neurotoxicidad, diabetes, enfermedades pulmonares y cardiovasculares. En particular, los infartos de miocardio inducidos por el Arsénico pueden suponer una importante causa de aumento de la mortalidad. En Taiwán, China, la exposición al Arsénico se ha vinculado a la "enfermedad del pie negro", una afección grave de los vasos sanguíneos que causa gangrena. Sin embargo, esta enfermedad no se ha observado en otras partes del mundo; es posible que la malnutrición contribuya a su desarrollo.

El Arsénico también se asocia a desenlaces adversos del embarazo y mortalidad infantil, repercute en la salud de los niños, y hay algunas pruebas de que puede tener una influencia negativa en el desarrollo cognitivo.

- **Tratamiento:** lavado gástrico con volumen controlado. El antídoto de elección y arma más eficaz en el tratamiento es el BAL® (Dimercaprol)³ que libera el As de las combinaciones enzimáticas reanudando la actividad bioquímica y favoreciendo su eliminación al aumentar su solubilidad al unirse con el BAL®, reduciendo su toxicidad. Se utiliza a dosis de 1.5 a 3 [mg/Kg/dosis], según severidad puede resultar beneficioso. En general el primer día una dosis cada 4 horas distanciando las dosis en los días siguientes hasta la desaparición de los síntomas. Este antídoto debe administrarse tanto a pacientes sintomáticos como asintomáticos que hayan tomado una dosis tóxica o

³Dimercaprol: compuesto oleoso líquido utilizado en medicina como agente quelante. Es soluble en agua hasta el punto de 8.7[g en 100[mL] y es utilizado como terapéutica en la intoxicación por exposición excesiva al Arsénico y otros metales pesados.

cuando cuantificamos arsenurias superiores a 200 [mg/L]. Para estos casos también cabe la posibilidad de administrar ácido dimercaptosuccínico (análogo del BAL®) ya que es también eficaz y además menos tóxico.

En el caso de intoxicaciones crónicas lo que se aconseja es la administración de penicilamina (Cupripen®)⁴, 250[mg] cada 6[h].

Para intoxicaciones por arsenamina ninguno de los tratamientos anteriores es eficaz ya que en estos casos debe realizarse una transfusión de sangre para evitar la hemólisis o hacer una exanguinotransfusión.

- **Concentración permitida en agua:** 10 [ug/L].

Cromo (Cr)

- **Fuentes de exposición:** el cromado, el curtido de cuero, el acero, el tratamiento de agua y el tratamiento de maderas.
- **Vía de ingreso del Cr(VI):** inhalatoria, fácilmente ingresa a las células donde es reducido a Cr(III). El Cr(III) causa cáncer de pulmón, perforación de tabique nasal, bronquitis, asma y dermatitis de contacto. A pesar de su carácter carcinogénico por inhalación, la OMS ha mantenido el valor guía provisorio de 0,05[mg/L] para el Cromo en agua, ya que entiende que este valor no presenta riesgos para la salud humana.
- **Manifestaciones clínicas:** irritación de las mucosas, vómito, diarrea, dolor abdominal y hemorragia intestinal, decremento del sentido del olfato, coloración amarilla en dientes y lengua, entre otros.
- **Tratamiento:** la ingestión de Cromo exige lavado gástrico. En las intoxicaciones agudas por sales hexavalentes de Cromo se debe administrar ácido ascórbico.
- **Concentración permitida en agua:** 50[ug/L].

⁴Penicilamina: producto de degradación de la penicilina, es un fármaco sin actividad anti microbiana, a la cual se le ha encontrado acciones de tipo quelante y anti inflamatorio en algunas formas de artritis. Permite la quelación del mercurio, el plomo, el cobre, el hierro y, probablemente, la de otros metales pesados, con los que forma complejos solubles estables que se excretan en la orina.

Cobre (Cu)

- **Fuentes de exposición:** conducciones de gas, colorantes y pesticidas, es utilizado junto con el Estaño para obtener Bronce.
- **Vía de ingreso del Cu:** el Cobre elemental solo es tóxico por vía respiratoria y ocular, las sales tienen absorción vía oral y son las que causan la mayoría de las intoxicaciones agudas.
- **Manifestaciones clínicas:** hiperpirexia, hipotensión y colapso cardiovascular, convulsiones y trastornos del movimiento, encefalopatía, cirrosis hepática y crisis hemolíticas, temblores, distonía, cambios de ánimo, cambios de comportamiento y cataratas.
- **Tratamiento:** terapia de quelación con penicilamina.
- **Concentración permitida en agua:** 2[mg/L].

Cadmio (Cd)

- **Fuentes de exposición:** es usado como aleación con otros metales, fabricación de acumuladores eléctricos, pigmentos para pinturas, soldaduras y en la industria del plástico, aunque en los alimentos también se puede encontrar.
- **Vía de ingreso del Cd:** se absorbe principalmente por vía respiratoria, la mayoría se deposita en el hígado y los riñones.
- **Manifestaciones clínicas:** náuseas, vómito, diarrea, dolor abdominal, neumonitis química, edema agudo de pulmón, se acumula en los huesos causando dolor, rinitis, anosmia, bronquitis y enfisema, es un cancerígeno de pulmón y próstata.
- **Tratamiento:** El agente quelante de elección es el EDTA, se administran 75[mg/kg/día]. No se debe usar el BAL, puesto que el compuesto BAL-Cadmio es tóxico. Para la intoxicación crónica no existe más tratamiento que el retirar al paciente de la fuente de tóxico.
- **Concentración permitida en agua:** 3[ug/L].

Mercurio (Hg)

- **Fuentes de exposición:** pilas, residuos industriales, minería, industria papelera, laboratorios y actividad volcánica.
- **Vía de ingreso del Hg:** respiratoria y digestiva.
- **Manifestaciones clínicas:** inicialmente compromete los pulmones con dolor torácico, tos, bronquitis, neumonitis, bronquiolitis que pueden llevar a una falla respiratoria. Conjunto a esto también puede ser evidenciado compromiso gastrointestinal con dolor abdominal, náuseas, vómitos, diarrea y gingivitis. Al segundo y tercer día puede aparecer estomatitis con sialorrea, tumefacción gingival, halitosis y sabor metálico. En la última fase se tiene insuficiencia renal anúrica por necrosis tubular con intensa uremia.
- **Tratamiento:** suspender la exposición al metal y empezar tratamiento con agentes quelantes (penicilamina y dimercaprol entre otros).
- **Concentración permitida en agua:** 1[ug/L].

Plomo (Pb)

- **Fuentes de exposición:** desgaste geológico y emisiones volcánicas, baterías de autos, gasolina, plásticos, soldadura, municiones, juguetes, cerámicos, cosméticos, entre otros.
- **Vía de ingreso del Pb:** intestinal, respiratoria o dérmica.
- **Manifestaciones clínicas:** encefalopatía, insuficiencia renal y síntomas gastrointestinales, dificultad de concentración, línea oscura entre la base del diente y la base de la encía, compromiso del sistema nervioso y reproductor.
- **Tratamiento:** agentes quelantes.
- **Concentración permitida en agua:** 10[ug/L].

CAPÍTULO 3

La Electrocoagulación

En este capítulo se brinda al lector un *marco teórico* sobre los procesos electro-químicos que respaldan el desarrollo del presente proyecto.

3.1 ¿Que es la Electrocoagulación?

La coagulación es un fenómeno en el cual las partículas cargadas en suspensión coloidal son neutralizadas por colisión mutua contra iones y son aglomeradas, seguido esto por la sedimentación. Normalmente se agregan sustancias químicas para que se efectúe la coagulación, el Sulfato de Aluminio $[Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O]$ es una sustancia química que fue ampliamente utilizada durante años para el tratamiento de agua de desecho. Se acepta generalmente que la coagulación es provocada principalmente por la reducción de la carga superficial neta hasta un punto en el que las partículas coloidales, previamente estabilizadas por la repulsión electrostática, pueden acercarse lo suficientemente cerca para que las fuerzas de Van der Waals puedan mantenerlas juntas y permitir la agregación. La reducción de la carga superficial es una consecuencia de la disminución del potencial repulsivo de la doble capa eléctrica debido a la presencia de un electrolito con carga opuesta.

En el proceso Electrocoagulación (EC), el coagulante se genera in situ por oxidación electrolítica de un ánodo conformado con un material apropiado. En este proceso, las especies

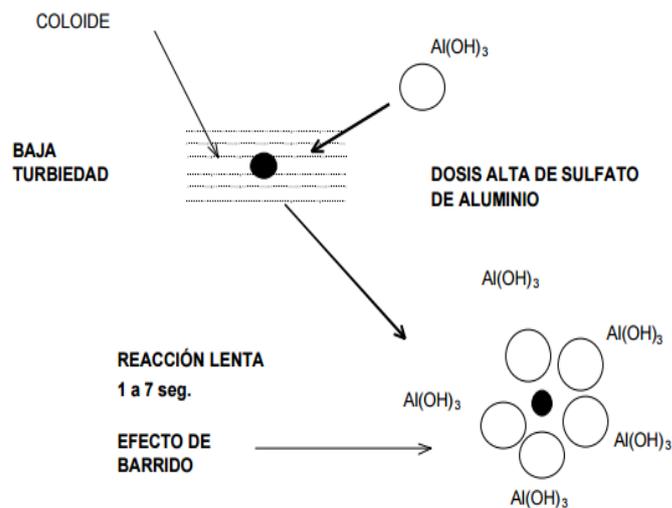


Fig. 3.1 La Coagulación.

iónicas cargadas (metales o de otro tipo) se eliminan de las aguas permitiendo que reaccionen con un ion que tiene carga opuesta, o con un floculo de hidróxidos metálicos generado dentro del effluente.

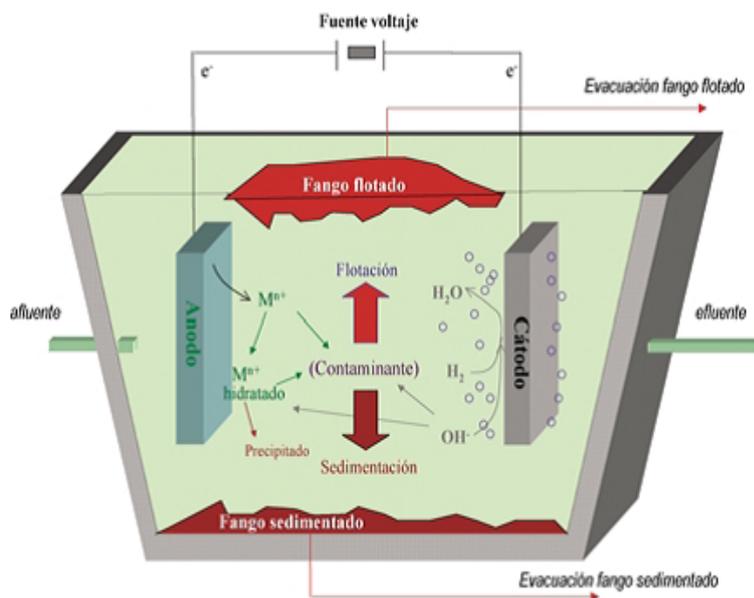


Fig. 3.2 La Electrocoagulación.

3.2 Fundamentos para su uso en la separación de partículas

La tecnología de la EC ofrece una alternativa al uso de sales o polímeros metálicos y adición de polielectrolitos para romper emulsiones y suspensiones estables. La EC elimina metales, sólidos coloidales, partículas y contaminantes inorgánicos solubles de medios acuosos mediante la introducción de especies poliméricas de Hidróxido metálico altamente cargadas. Éstas especies neutralizan las cargas electrostáticas sobre los sólidos suspendidos y se utilizan pequeñas gotas de aceite para facilitar la aglomeración o coagulación y separación resultante de la fase acuosa. El tratamiento induce la precipitación de ciertos metales y sales. Las ventajas y desventajas de la tecnología EC se discuten a continuación:

3.2.1 Ventajas de la Electrocoagulación:

- EC requiere equipos sencillos y es fácil de operar con suficiente latencia operativa para manejar la mayoría de los problemas encontrados en la ejecución.
- Las aguas residuales tratadas por EC proporcionan agua clara, incolora e inodora.
- El lodo formado por EC tiende a ser fácilmente asentable y fácil de desaguar, porque esta compuesto principalmente de óxidos / hidróxidos metálicos. Sin embargo ésta técnica es de baja producción de lodo.
- Los flóculos formados por EC son similares a los flóculos químicos, excepto en que el flóculo obtenido en la EC tiende a ser mucho más grande, contiene menos agua ligada, es resistente al ácido y más estable, y por lo tanto, pueden ser separados más rápidamente utilizando filtración.
- La EC produce efluentes con menos contenido de sólidos disueltos totales (SDT) en comparación con tratamientos químicos. Si se reutiliza este agua, el bajo nivel de SDT contribuye a un menor costo de recuperación del agua.

- El procedimiento de EC tiene la ventaja de eliminar las partículas coloidales más pequeñas, debido a que el campo eléctrico aplicado las pone en movimiento más rápido, facilitando así la coagulación.
- El proceso de EC evita el uso de productos químicos, por lo que se evita el problema de neutralizar el exceso de químicos y además no hay ninguna posibilidad de contaminación secundaria causada por las sustancias químicas que son añadidas en alta concentración cuando se utiliza la coagulación química de las aguas residuales.
- Las burbujas de gas producidas durante la Electrolisis pueden transportar el contaminante a la superficie de la solución donde puede ser mas fácilmente concentrado, recolectado y eliminado.
- Los procesos electrolíticos en la celda EC son controlados eléctricamente sin partes móviles, lo que implica un menor trabajo de mantenimiento.
- La técnica de EC puede usarse convenientemente en zonas rurales donde no se dispone de electricidad, ya que un panel solar unido a la unidad puede ser suficiente para llevar a cabo el proceso.

3.2.2 Desventajas de la Electrocoagulación:

- Los "electrodos de sacrificio" se disuelven en el agua de desecho como producto de la Oxidación producida en ellos con lo cual deben ser cambiados con regularidad.
- El uso de la electricidad puede ser costoso en muchos lugares.
- Puede formarse una película de óxido impermeable en el cátodo que conduce a la pérdida de eficacia de la unidad de EC.
- Se requiere alta conductividad de las aguas residuales a ser tratadas.
- El hidróxido gelatinoso tiende a solubilizarse en algunos casos.

Habiendo explicado los fundamentos de la tecnología y considerando las ventajas y desventajas de la misma se llegó a la conclusión que el proceso de la electrocoagulación, es un proceso por demás eficiente y "limpio" a la hora de realizar filtrado de partículas. Las ventajas justifican su uso pese a las desventajas, además de que las pocas contras existentes pueden ser solventadas con facilidad. Por ejemplo: el problema del precio elevado para el uso de la electricidad puede ser remediado mediante la utilización de paneles solares para la alimentación del sistema, lo cual representaría una solución barata y eco-amigable ajustándose a la perfección a los objetivos del proyecto.

3.3 Electro-coagulador con múltiples ánodos de sacrificio y agitador magnético

A medida que el área de los electrodos aumenta, la capacidad del dispositivo para tratar la solución aumenta. Por ello, existen configuraciones de celda más potentes utilizando electrodos mono-polares, ya sea en paralelo o en serie. Estas configuraciones consisten en pares de placas de metales de material conductivo, ubicadas entre los electrodos conectados a la fuente de tensión. En un arreglo mono polar, cada par de electrodos de sacrificio se encuentra unido de forma eléctrica, pero no tienen conexión con los electrodos conectados al circuito (ver figura 3.3). [6]

Este arreglo de electrodos es similar a un arreglo de muchos electrodos interconectados, con la diferencia de que en este caso se requiere un control preciso de las variables de tensión y corriente (objetivos del presente proyecto). El ánodo de sacrificio reduce el potencial de disolución del ánodo y minimiza la reducción de los elementos en el cátodo. Con distintos materiales se construyen distintos tipos de electrodos, siendo el aluminio una opción eficiente y de bajo costo, y el titanio, por ejemplo, una de las mejores opciones cuando el costo no es un inconveniente. Para mejorar aún mas la eficiencia del sistema, es posible agregar un agitador magnético en el recipiente, esto se tuvo en cuenta al agregar una salida para una señal de ancho de pulso modulado en el circuito diseñado, como se verá en capítulos posteriores. [6]

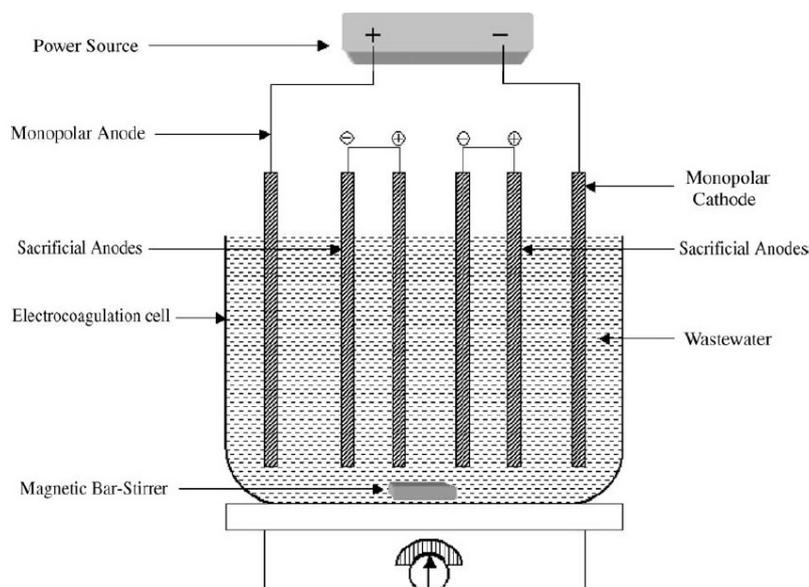


Fig. 3.3 Celda con agitador magnético y ánodos de sacrificio mono-polares.

El uso de un agitador mecánico tiene como objetivo incrementar la turbulencia (o, si no existe flujo, generarlo). El aumento de turbulencia reduce la capa de elementos pasivados cerca de los electrodos, además de barrer con burbujas de gas generadas en ellos (como hidrógeno y oxígeno). Estas burbujas de gas reducen la superficie del electrodo, provocando un aumento de la impedancia y consecuente disminución de la corriente. Otros ejemplos de configuración para la celda electrolítica se pueden observar en la figura 3.4.

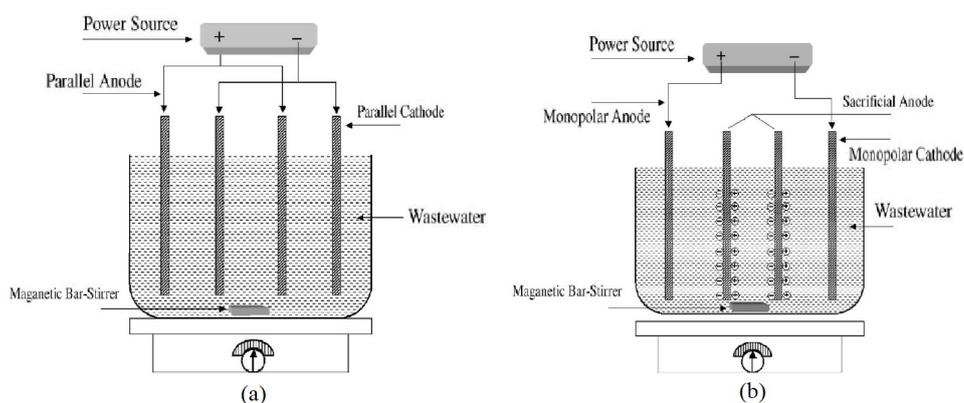


Fig. 3.4 (a) Configuración de celdas con electrodos en paralelo (b) Configuración de celdas con electrodos di-polares.

3.4 Antecedentes

El tratamiento de aguas residuales por EC se ha practicado durante la mayor parte del siglo 20 con éxito y popularidad limitados. En la última década, esta tecnología ha sido cada vez más utilizada en América del Sur y Europa para el tratamiento de aguas residuales industriales que contienen metales. También se ha observado que en América del Norte la EC se ha utilizado principalmente para tratar el agua de desecho de las industrias de la pulpa y del papel, de la minería y de la metalurgia. Además, la EC ha sido aplicada para tratar el agua que contiene desechos de productos alimenticios, desechos de petróleo, tintes, partículas suspendidas, residuos de pulido químicos y mecánicos, materia orgánica de los lixiviados del vertedero, de la defluoración del agua, de los efluentes detergentes sintéticos, residuos de minas y la solución de metales pesados que contienen. La tecnología ha sido optimizada para minimizar el consumo de energía eléctrica y maximizar las tasas de rendimiento de los efluentes.

CAPÍTULO 4

Placa de desarrollo y Software embebido

El presente capítulo ofrece un pequeño *marco teórico* sobre las características en referencia al sistema embebido y sus periféricos, para comenzar luego con el *marco metodológico* correspondiente. El programa completo implementado se puede encontrar en el DVD adjunto al presente informe.

4.1 Placa de desarrollo

Se presentan a continuación las características generales de la placa de desarrollo utilizada, modelo KL46Z de Freescale. El fabricante lista:

- Microcontrolador MKL46Z256VLL4MCU–48[MHz], 256[kB] flash, 32[kB] SRAM, segment LCD, USB OTG(FS) , 100 LQFP.
- Opciones de alimentación flexibles.
- Pines MCU I/O de fácil acceso.
- Lista para usar con batería externa, con puntos de medición accesibles.
- Factor de Forma compatible con Arduino TM R3.

- OpenSDA debug interface.
- Programación mediante protocolo de almacenamiento masivo tipo Flash.
- CMSIS-DAP interface.

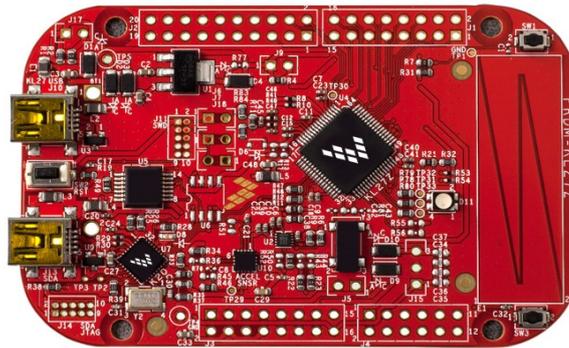


Fig. 4.1 FRDM-KL46Z.

4.1.1 Periféricos adicionales embebidos

- Open SDA.
- Modulo LCD de 4 dígitos.
- Slider Capacitivo.
- Sensor de luz ambiente.
- MMA8451Q acelerómetro.
- MAG3110 Magnetómetro.
- 2 LEDs.
- 2 push buttons.

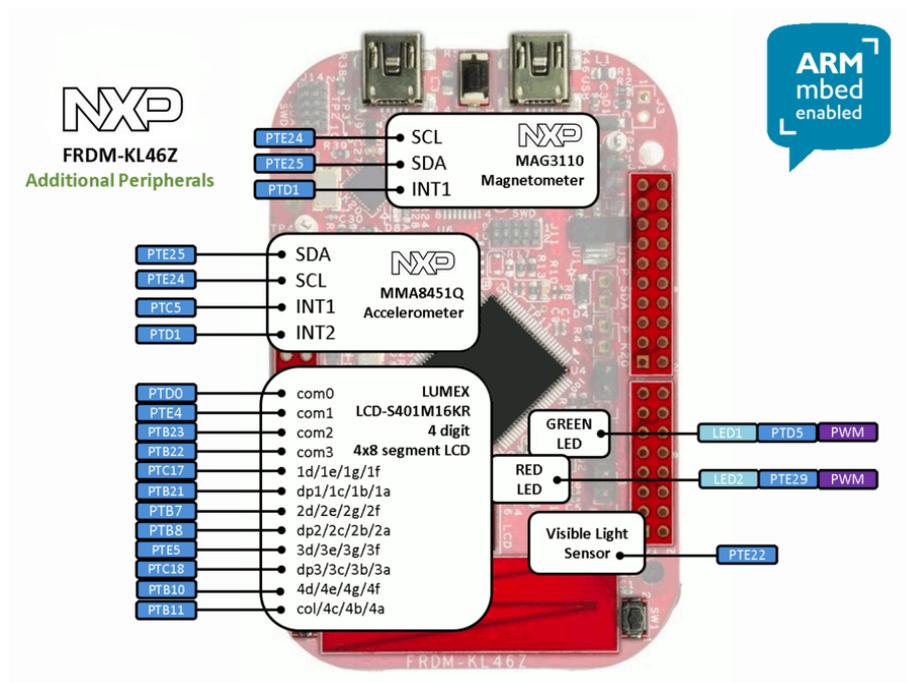


Fig. 4.2 Periféricos embebidos.

4.1.2 Características del Microcontrolador

Integración de sistemas:

- Gestión de energía y controladores de modo.
- Unidad de despertar de baja fuga.
- Motor de manipulación de bits para operaciones de lectura modificación-escritura de periféricos.
- Controlador de acceso directo a la memoria (DMA).
- COP Watchdog.
- Relojes.
- Módulo de reloj con FLL y PLL.
- Reloj de referencia interno de 4[MHz] y 32[kHz].

- Sistema de oscilador que soporta cristal o resonador externo.
- Oscilador RC de baja potencia 1[kHz] para RTC y COP watchdog.
- Periféricos analógicos.
- Soporte de SAR ADC w/DMA de 16 bits.
- Soporta DAC de 12 bits con DMA.
- Comparador de alta velocidad.

Periféricos de comunicación:

- Una interfaz de audio Interchip Sound (I²S) integrada (SAI).
- Dos Interfaces Periféricas Seriales de 8 bits (SPI).
- Controlador de doble función USB con transceptor incorporado FS/LS.
- Regulador de voltaje USB.
- Dos módulos I²C.
- Un UART de baja potencia y dos módulos UART estándar.
- Temporizadores.
- Un módulo de 6 canales de temporizador/PWM.
- Dos módulos de 2 canales de temporizador/PWM.
- Temporizador de interrupción periódica de 2 canales (PIT).
- Reloj en tiempo real (RTC).
- Temporizador de baja potencia (LPT).
- Temporizador de comprobación del sistema.

- Interfaces Hombre-Máquina (HMI).
- Controlador LCD de segmento. El segmento máximo es 8X47 o 4x51.
- Controlador de entrada/salida de propósito general.
- Sensor táctil capacitivo interfaz de entrada módulo de hardware.

4.2 Sistema operativo

Para el desarrollo de aplicaciones fue utilizado el sistema operativo MBED extraído de la página oficial de los desarrolladores¹. MBED es un sistema operativo integrado de código abierto diseñado específicamente para las "cosas" en Internet de las Cosas (También denominado IoT por su denominación en inglés "Internet Of Things"). Incluye todas las características que se necesitan para desarrollar un producto conectado basado en un microcontrolador ARM Cortex-M, incluyendo seguridad, conectividad, RTOS y controladores para sensores y dispositivos de E/S. El proyecto es desarrollado de manera colaborativa por ARM y sus socios tecnológicos. En sus últimas versiones incorpora funcionalidades que pueden ser utilizadas para prepararse para los próximos servicios de gestión de dispositivos MBED Cloud. Esto incluye infraestructura del gestor de arranque y del sistema de ficheros y la pila certificada Thread 1.1 para desarrolladores. Además se incluye soporte de sistema de archivos flexible para satisfacer las necesidades de las aplicaciones IoT que requieren almacenamiento dentro del nodo final, como así también sistema de archivos FAT para medios extraíbles, como tarjetas SD, y en sus futuras versiones se agregarán sistemas de archivos flash incorporados.

Las aplicaciones para la plataforma MBED se pueden desarrollar utilizando el IDE on-line de MBED, un editor de código en línea para trabajar directamente con MBED OS o IDEs de terceros. El IDE on-line de MBED proporciona espacios de trabajo privados con capacidad para importar, exportar y compartir código con el control de versiones distribuido de Mercurial, y también puede usarse para la generación de documentación de código.

¹<https://www.mbed.com/>

También pueden desarrollarse aplicaciones con otros entornos de desarrollo como Keil uVision, IAR Embedded Workbench y Eclipse con herramientas GCC ARM Embedded.

4.2.1 Entorno de desarrollo

Para la programación del microcontrolador fue escogido el IDE online entre las opciones mencionadas. El entorno de desarrollo utilizado² presenta grandes beneficios en cuanto a su facilidad de aplicación, con el agregado de gran cantidad de documentación y ejemplos a disposición que permiten obtener una mejor curva de aprendizaje.

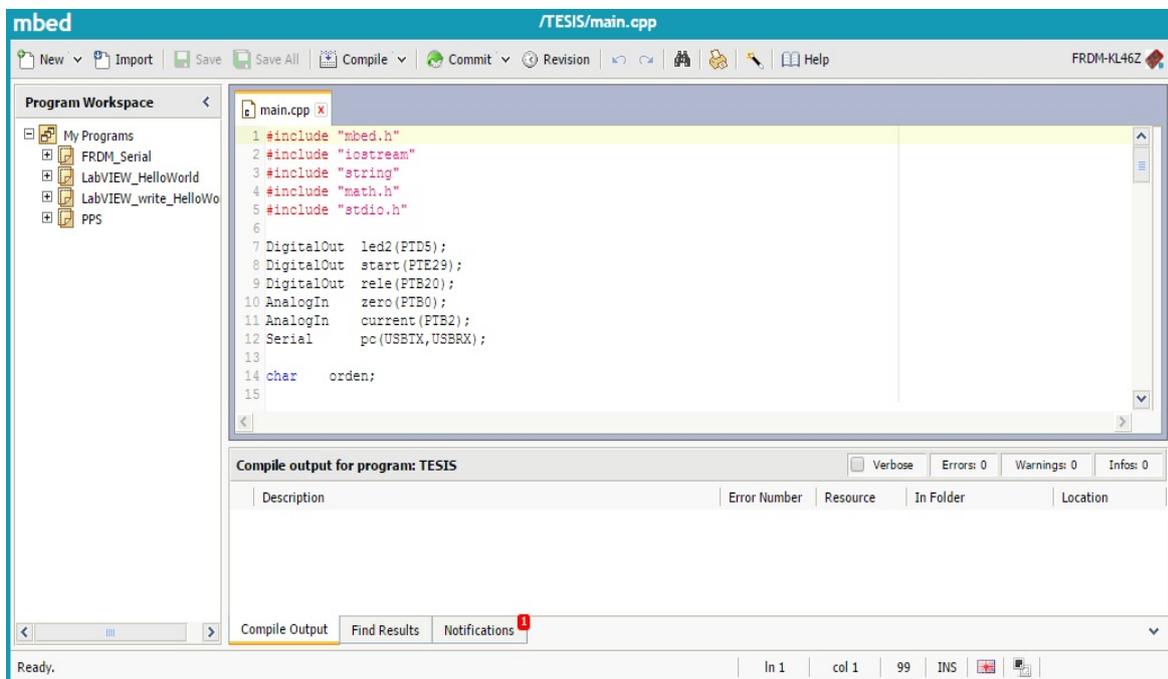


Fig. 4.3 IDE de MBED.

Es posible observar en la Fig 4.3 a la izquierda el "Program Workspace" donde el usuario dispondrá de todos los programas que vaya desarrollando. A la derecha de la imagen presentada se encuentra una pestaña con la sección principal de un código simple a modo de ejemplo y por debajo de esta una ventana donde se presentarán todos los mensajes surgidos luego de compilar el código, advertencias, descripción de errores y demás.

²<https://developer.mbed.org/compiler/>

4.3 Puesta en funcionamiento

El primer paso para poder programar el dispositivo consistió en instalar el firmware necesario, utilizando el modo "Flash", a partir de este punto el dispositivo pudo ser programado a través de la modalidad "Drag & drop". Por otro lado en el workspace fue seleccionado el dispositivo a ser utilizado, con el objetivo de establecer una correlación entre el entorno de desarrollo y la placa a programar. La modalidad de programación "Drag & drop" implica que para programar el dispositivo simplemente se debe copiar el archivo hexadecimal generado al compilar el código en el IDE online dentro del dispositivo de memoria volátil emulado "MBED" (Cabe aclarar que el sistema base en PC es Windows) y una vez los destellos de la placa de desarrollo que indican su programación cesan, oprimir el botón de reset concluyendo el proceso de programación correspondiente. El lenguaje utilizado para el desarrollo es C++.

4.4 Desarrollo del software para la placa de desarrollo

Considerando finalizado el *marco teórico* se procede entonces a dar inicio al *marco metodológico* comenzando por el desarrollo de software embebido en la placa de desarrollo escogida para el proyecto integrador. Inicialmente se explica en detalle cada bloque de código y al final (Fig. 4.6) se adjunta el diagrama de flujo del código completo para mayor comprensión.

4.4.1 Conversor Analógico-Digital

Luego de realizadas las primeras pruebas introductorias para comprender el funcionamiento del entorno de desarrollo en conjunto con la placa, a través de ejemplos simples, el siguiente paso sería comenzar a desarrollar el software a ser implementado en el proyecto integrador.

Considerando las características del sistema a desarrollar, en el cual se deberían medir las distintas variables intervinientes, es que surgió la necesidad de utilizar los conversores analógico digitales, comunmente conocidos como "ADC", del microcontrolador.

Estos ADC son de 16 bits aplicados en un rango de 3.3[V] lo que representa una muy buena resolución (50[uV] aproximadamente) permitiendo una medición de gran precisión con un delta de error despreciable.

Las variables sometidas a la conversión analógico digital son: la diferencia de potencial existente entre los electrodos, la tensión a la salida del conversor digital analógico (DAC), la caída de tensión presente en la resistencia shunt y la tensión "arrojada" por el sensor de temperatura la cual es proporcional a la temperatura del medio en el que se encuentra inmerso el sensor.

La medición de la d.d.p. existente entre electrodos sirve para efectuar el control de tensión, es decir, se mide la d.d.p. presente, se compara dicho valor con el valor seteado como referencia y en función de la diferencia existente entre estos dos valores se aumenta o disminuye la tensión arrojada por el DAC que produce el ajuste de d.d.p. entre electrodos para adecuarse con la referencia.

Luego se tiene la medición de tensión presente a la salida del DAC, esto si bien no cumple una función vital para el correcto funcionamiento del sistema es de gran utilidad para establecer una buena correlación entre la d.d.p. existente entre electrodos y la tensión utilizada para realizar el control. En el capítulo 7 se habla mas en profundidad sobre el tema pudiendo observar la correlación mencionada en las figuras 7.19 y 7.20.

La caída de tensión en la resistencia shunt sirve para obtener el valor de corriente en circulación entre electrodos. Dicha corriente va variando en función del avance del proceso de electrocoagulación, con lo cual representa una variable fundamental para poder establecer un seguimiento del mismo.

La tensión arrojada por el sensor de temperatura es utilizada para determinar la temperatura del medio en el cual el sensor se encuentra inmerso, esto es útil ya que en determinados casos la temperatura influye de gran manera en el normal avance del proceso electro-químico implicado.

Se procede entonces a adjuntar la sección de código encargada de dar funcionamiento a los ADC el micro-controlador.

```
[...]  
AnalogIn    zero (PTB0);  
AnalogIn    ddpShunt (PTB2);  
AnalogIn    ddpElectrodos (PTC1);  
AnalogIn    ddpDAC (PTC2);  
AnalogIn    ddpTemp (PTB3);  
[...]  
void serialPC_interrupt ()  
{  
    orden=bt.getc ();  
    switch (orden)  
    {  
        [...]  
        case ( 'm' ) :  
        case ( 'M' ) :  
            bt.printf ("%f\n", ddpShunt.read ());  
            break ;  
  
        case ( 'd' ) :  
        case ( 'D' ) :  
            bt.printf ("%f\n", ddpDAC.read ());  
            break ;  
  
        case ( 't' ) :  
        case ( 'T' ) :  
            bt.printf ("%f\n", ddpTemp.read ());  
            if (escribirSD ())  
            {aux=1;}  
            break ;
```

```
case ( ' e ' ) :  
case ( ' E ' ) :  
    bt . printf ( "%f \n" , ddpElectrodos . read ( ) ) ;  
    break ;  
[ ... ]
```

Inicialmente se tiene la declaración de variables según la necesidad de medición sobre la cual se habló previamente. Luego se encuentra el segmento de código en el cual el software de instrumentación virtual (SIV) realiza la solicitud de las mediciones correspondientes al microcontrolador. Como es posible observar el SIV solo pide el dato leído directamente del ADC, esto significa que el dato enviado por el microcontrolador al SIV es simplemente un float con un valor entre 0 lógico (0[V]) y 1 lógico[3.3[V]] con lo cual dicho dato debe ser tratado por software para poder representar el valor real de la medición, esto último se realiza multiplicando el dato por 3.3 y para el caso particular de la temperatura también se debe multiplicar 100.

4.4.2 Comunicación con la plataforma de instrumentación virtual

Lo primero a especificar es el tipo de comunicación utilizada. En este caso fue escogida la comunicación del tipo serie asincrónica, protocolo muy común para comunicación entre dispositivos. Para establecer la comunicación fue utilizado uno de los módulos UART³ existentes en el microcontrolador. Las características más importantes de la comunicación serie asincrónica son la velocidad de transmisión, los bits de datos, los bits de parada, y la paridad. Para que dos puertos se puedan comunicar, es necesario que las características sean iguales. Para este caso en particular fue utilizada una velocidad de transmisión de 9600[Bps], 8 bits de datos, 1 bit de parada y sin paridad.

³UART, son las siglas en inglés de Universal Asynchronous Receiver-Transmitter, en español: Transmisor-Receptor Asíncrono Universal, es el dispositivo que controla los puertos y dispositivos serie.

Una vez escogido el tipo de comunicación a ser utilizada lo siguiente fue establecer el método para efectuar la vinculación entre el SIV desarrollado y la placa de desarrollo escogida.

El protocolo aplicado consiste en la utilización de interrupciones en conjunto con una estructura de programación denominada "Switch Case". Dicho protocolo funciona de la siguiente manera: el SIV induce una interrupción del micro-controlador, este ultimo entrega o recibe un dato en función del código ASCII ⁴ provisto a tal fin. Se presentan a continuación los códigos utilizados y sus equivalentes.

Datos a ser provistos por el micro-controlador hacia el SIV

- E: d.d.p. medida entre electrodos.
- M: caída de tensión en la resistencia shunt.
- D: tensión a la salida del DAC
- T: temperatura sensada.

Datos a ser provistos por el SIV hacia el microcontrolador

- V: d.d.p. requerida entre electrodos.
- K: ganancia del lazo de control de tensión.
- H: hora actual.
- Z: zona horaria, latitud y longitud.

Cada símbolo del código ASCII utilizado tiene un "case" asociado, esto quiere decir que cada uno de ellos da inicio a una función distinta. Algunos símbolos producen la transferencia de datos obtenidos por el micro-controlador hacia el SIV y otros dan inicio a la transferencia

⁴El código ASCII es conocido como el acrónimo de las palabras inglesas American Standard Code for Information Exchange y en español significa Código Estadounidense Estándar para el Intercambio de Información, este código está basado integralmente en el alfabeto latino que tiene distintos tipos de usos y puede tratarse de una combinación de símbolos en el marco de un sistema establecido que cuenta con un cierto valor.

de datos provenientes del SIV hacia el micro-controlador estableciéndose así un enlace donde ambos dispositivos son "cliente" y "proveedor" en lo que a transmisión de datos respecta.

```
[...]
Serial      bt(PTE0,PTE1,9600);
[...]
void serialPC_interrupt()
{
    case('?'):
        orden=bt.getc();
        switch (orden)
        {
            case('a'):      // "A" ngulo
            case('A'):
                bt.printf("Parametros del servomotor: ");
                bt.printf("%i\n", grados);
                bt.printf("%f\n", pulse);
                break;

            case('d'):      // "D" atos
            case('D'):
                bt.printf(" Tension en la resistencia calibrada: ");
                bt.printf("%f\n", ddpShunt.read()*3.3);
                bt.printf(" Senal de error para el sistema de control: ");
                bt.printf("%f\n", vError);
                bt.printf(" Senal de control medida: ");
                bt.printf("%f\n", ddpDAC.read()*3.3);
                bt.printf(" Tension de control utilizada: ");
                bt.printf("%f\n", vdacOut*3.3);
                bt.printf(" Tension de referencia establecida: ");
```

```

    bt.printf("%f\n", vRef);
    bt.printf("_Tension_de_anodizacion_medida:_");
    bt.printf("%f\n", ddpElectrodos.read()*3.3);
    break;

        case('h'): // "H" orario
        case('H'):
    bt.printf("_Minuto_de_ocaso_calculado:_");
    bt.printf("%02d\n", minutoOcaso);
    bt.printf("_Minuto_de_amanecer_calculado:_");
    bt.printf("%02d\n", minutoAmanecer);
    break;
    [...]
int main()
{
    [...]
    bt.attach(&serialPC_interrupt);
    [...]
}

```

Al inicio del segmento de código anterior es posible notar la declaración de la variable a ser utilizada para la comunicación serie (bt), PTE0 indica el pin a ser utilizado para la transmisión de datos del micro-controlador al SIV (TX), PTE1 indica el pin a ser utilizado para la recepción de datos del SIV por parte del micro-controlador (RX) y 9600 es la velocidad de transmisión expresada en bits por segundo.

Lo que se tiene a continuación en el segmento de código presentado es el bloque "Switch Case" que permite la transmisión de datos correspondiente. Con la finalidad de evitar la extensión innecesaria de la sección aquí tratada se ponen solo algunos de los bloques "case" utilizados como parte del protocolo de comunicación elegido, si fuese requerida una investigación mas exhaustiva el código completo se encuentra en los anexos. El "case ('v')"

es utilizado para la transmisión de la d.d.p. entre electrodos de referencia desde el SIV hacia el micro-controlador. El "case ('e')" es utilizado para la transmisión de la d.d.p. entre electrodos medida por el micro-controlador hacia el SIV. Los demás "case" son análogos a los presentados. También es posible apreciar la presencia de "case ('?')" utilizado para "debuggear"⁵ el código en caso de ser necesario. El "case ('o')" es utilizado para transmitir desde el micro-controlador hacia el SIV la zona horaria, longitud y latitud establecidas previamente.

Por último se encuentra una línea de código inmersa en el bloque principal. Dicha línea establece un vínculo entre la variable utilizada para la comunicación serie asincrónica y uno de los tipos de interrupciones posibles de ser generadas en el micro-controlador, la interrupción por comunicación serie.

Bluetooth

Inicialmente la comunicación de la placa de desarrollo con la PC fue planteada a través de la utilización de un cable de transmisión, el mismo que se utiliza para programar y alimentar el micro-controlador debido a que las características propias del mismo así lo permiten. Sin embargo un desafío propuesto durante el desarrollo del proyecto implicó la transmisión inalámbrica de datos, para lo cual fue necesaria la utilización de un módulo de transmisión bluetooth HC-05. Este módulo viene configurado de fábrica para trabajar como maestro o esclavo (esclavo por defecto). En el modo maestro puede conectarse con otros módulos bluetooth, mientras que en el modo esclavo queda a la escucha peticiones de conexión. El modulo bluetooth HC-05 utiliza el protocolo UART RS 232 serial lo que permitió una fácil adaptación a la configuración previamente establecida, tan solo fue necesario conectar el TX y el RX de la placa de desarrollo a los pines correspondientes en el módulo, alimentar el mismo y buscarlo con la PC para establecer la conexión.

A continuación se listan las características del módulo:

- Especificación bluetooth v2.0+EDR (Enhanced Data Rate).

⁵"Debuggear" es el proceso de búsqueda y resolución de defectos que impiden el correcto funcionamiento del software de un ordenador o de un sistema.

- Puede configurarse como maestro, esclavo, y esclavo con autoconexión (Loopback) mediante comandos AT.
- Chip de radio: CSR BC417143
- Frecuencia: 2.4[GHz], banda ISM.
- Modulación: GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying).
- Antena de PCB incorporada.
- Potencia de emisión: ≤ 4 [dBm], Clase2.
- Alcance 5[m] a 10[m]
- Sensibilidad: ≤ -84 [dBm] a 0.1% BER.
- Velocidad: Asíncronica: 2.1[Mbps] (max.)/160[kbps], sincrónica: 1[Mbps]/1[Mbps].
- Seguridad: Autenticación y encriptación (Password por defecto: 1234).
- Perfiles: Puerto serial Bluetooth.
- Módulo montado en tarjeta con regulador de voltaje y 6 pines suministrando acceso a VCC, GND, TXD, RXD, KEY y status LED (STATE).
- Consumo de corriente: 50[mA].
- Niveles lógicos: 3.3[V].
- Voltaje de alimentación: 3.6[V] a 6[V].
- Dimensiones totales: 1.7[cm]x4[cm] aprox.
- Temperatura de operación: -20[°C] a +75[°C].



Fig. 4.4 Módulo Bluetooth.

4.4.3 Conversor Digital-Analógico

El sistema a ser desarrollado por un lado debía adquirir datos con la mayor precisión y velocidad posible, y por otro también utilizar los mismos con la finalidad de efectuar un control eficaz del proceso electro-químico implicado. Con el objetivo de poder realizar el control mencionado es que se utilizó el conversor digital analógico (DAC) del micro-controlador. Dicho DAC es de 12 bits con un rango de salida de voltaje de $1/4096 V_{in}$ a V_{in} , y el paso es $1/4096 V_{in}$, donde V_{in} es la tensión de entrada, por lo tanto considerando una $V_{in} = 3.3[V]$ va desde $244[uV]$ aproximadamente hasta $3.3[V]$ con un paso de $244[uV]$, mas que suficiente considerando que dicha señal puede ser amplificada a través de un circuito externo como fue realizado en este proyecto integrador (para información mas detallada remitirse a la sección 7.4.2, Control de tensión de anodización).

Sistema de control de tensión a lazo cerrado

A través de las herramientas presentadas hasta el momento (ADC, comunicación y DAC) fue posible desarrollar el lazo cerrado de control de tensión necesario para el sistema.

El proceso fluye de la siguiente manera: inicialmente la d.d.p. entre electrodos depende de la fuente de alimentación y el mosfet utilizado llevando a la misma a valores que rondan $1[V]$ de tensión, esta tensión es medida por el ADC y comparada en el micro-controlador con la d.d.p. de referencia entre electrodos provista por el SIV. En función de la diferencia

detectada el micro-controlador decide si aumentar o disminuir la tensión de salida del DAC en una proporción dependiente de la ganancia de lazo elegida en el SIV. Luego la d.d.p. pasa a depender de la tensión de salida del DAC y del avance del proceso electroquímico que trae aparejada la variación de corriente circulante entre los electrodos con la consecuente modificación de la d.d.p. existente entre ellos, hecho que es revertido a través de la aplicación del lazo de control de tensión. Para poder implementar el proceso mencionado fue desarrollado el segmento de código presentado a continuación.

```
[...]  
AnalogOut    DACout(PTE30);  
[...]  
void serialPC_interrupt()  
{  
    orden=bt.getc();  
    switch (orden)  
    {  
        [...]  
        case ('k'):  
        case ('K'):  
            for (i=0; i<5; i++)  
            {  
                p[i]=bt.getc();  
            }  
            temp2=p;  
            k=atof(temp2.c_str());  
            DAC();  
            break;  
        [...]  
    }  
    return;
```

```
}  
[...]  
void DAC()  
{  
    vError=ddpElectrodos.read()*3.3*14.7/4.7 - vRef;  
    vdacOut=vdacOut-(vError*k);  
    if(vdacOut<0)  
        {vdacOut=0.0f;}  
    DACout.write(vdacOut);  
}  
[...]
```

Inicialmente en el segmento de código adjuntado se presenta la declaración de la variable a ser utilizada para el manejo de la salida del DAC. La tensión de salida del DAC se encontrará en el pin PTE30 de la placa de desarrollo, con lo cual el circuito acoplador de señal de control debe ser conectado a dicho pin.

La segunda parte del bloque de código muestra el "case" encargado de recibir la ganancia de lazo de tensión provista por el SIV según el requerimiento del usuario. Una vez recibido el dato correspondiente, se procede a llamar a la función "DAC" la cual realiza el control. Lo primero que realiza "DAC" es la comparación entre la d.d.p. existente entre los electrodos y la d.d.p. requerida por el usuario. La diferencia encontrada, también conocida como "error", es multiplicada por la ganancia de lazo de tensión y el valor obtenido se resta al valor de tensión existente a la salida del DAC guardando el resultado en la variable "vdacOut". En el caso de que el resultado guardado en la variable sea negativo se lleva el mismo a cero para evitar que el micro-controlador intente poner la tensión de salida del DAC en un valor negativo lo que no es posible.

Suponiendo que la d.d.p. de referencia "vRef" es menor que la d.d.p. existente entre los electrodos "ddpElectrodos" entonces en "vError" será guardado un valor positivo que al ser multiplicado por "k" da como resultado otro valor positivo por lo tanto al restar este último a "vdacOut" el valor existente en dicha variable se verá disminuido por lo que la tensión de

salida del DAC bajará produciendo la disminución de la d.d.p. entre electrodos hasta llegar a la d.d.p. de referencia. Para el caso contrario donde "vRef" es mayor que la d.d.p. entre electrodos en "vError" será almacenado un valor negativo que al ser multiplicado por "k" da como resultado otro valor negativo. Al realizar la resta entre "vdacOut" y el número negativo mencionado el resultado obtenido es un número mayor que el que se tenía previamente, esto implica el aumento de la tensión de salida DAC con el consecuente aumento de la d.d.p. entre electrodos ajustándose a la d.d.p. de referencia con lo cual el lazo de control de tensión de primer orden queda conformado.

4.4.4 Almacenamiento de datos en tarjeta SD

Otra actividad mas desarrollada consistió en el almacenamiento de datos en una memoria volátil del tipo tarjeta SD, para ello fue utilizado un modulo interfaz para memoria SD regulado.

Si bien los datos también son transferidos vía comunicación serie hacia la PC siempre puede ser de utilidad tener otro modo de almacenamiento para mayor seguridad, y además por su pequeño volumen la tarjeta SD no presenta inconvenientes para su traslado lo cual permite transportar la información hacia otro terminal sin la necesidad de una conexión extra de ningún tipo y utilizando tablas de cálculo (p.e Hojas de cálculo de Microsoft Excel) se pueden obtener fácilmente gráficos representativos del proceso. En la figura 4.5 es posible observar el modulo escogido, además se adjunta el segmento código utilizado para cumplir el objetivo tratado en esta sección.



Fig. 4.5 Módulo interfaz SD.

```
[...]  
void configurarSD(void);  
int escribirSD(void);  
bool archivoExiste(const char);  
  
SDFileSystem sd(PTA16, PTA17, PTA15, PTA14, "sd");  
[...]  
void serialPC_interrupt()  
{  
    orden=bt.getc();  
    switch (orden)  
    {  
        [...]  
        case ('t'):  
        case ('T'):  
            bt.printf("%f\n", ddpTemp.read());  
            if(escribirSD())  
                {aux=1;}  
            break;  
        [...]  
    }  
    return;  
}  
[...]  
void configurarSD()  
{  
    mkdir("/sd", 0777);  
    idle();  
    sd.crc(true);  
}
```

```
    idle ();
    sd.large_frames ( true );
    idle ();
    sd.write_validation ( false );
    idle ();
    sd.mount ();
}

bool archivoExiste ( const char * fileName )
{
    std::ifstream infile ( fileName );
    return infile.good ();
}

int escribirSD ( void )
{
    NVIC_DisableIRQ ( UART1_IRQn );
    if ( archivoExiste ( "/sd/Data.txt" ) )
    {
        if ( ( fp = fopen ( "/sd/Data.txt", "a+" ) ) == NULL )
        {
            return 1;
        }
        else
        {
            aux = !aux;
            fprintf ( fp, "%i", hour );
            fprintf ( fp, ":" );
            fprintf ( fp, "%i", minute );
            fprintf ( fp, "\t" );
            fprintf ( fp, "%.4f\t", ddpDAC.read () * 3.3 );
        }
    }
}
```

```
fprintf(fp, "%.4f\t", ddpElectrodos.read()*3.3);
fprintf(fp, "%.4f\t", ddpShunt.read()*3.3);
fprintf(fp, "%.4f\r\n", ddpTemp.read()*330);
fclose(fp);
}
}
NVIC_EnableIRQ(UART1_IRQn);
return 0;
}
[...]
```

```
int main()
{
[...]
```

```
configurarSD();
[...]
```

```
}
```

Inicialmente en el segmento de código se tienen las declaraciones de funciones a ser utilizadas. Luego se presenta la línea de código encargada de programar los pines necesarios para establecer el enlace entre el modulo interfaz SD y la placa de desarrollo. La comunicación utilizada del tipo SPI ⁶. Según el protocolo SPI existen cuatro líneas lógicas encargadas de realizar todo el proceso:

- MOSI (Master Out Slave In): línea utilizada para llevar los bits que provienen del maestro hacia el esclavo.
- MISO (Master In Slave Out): línea utilizada para llevar los bits que provienen del esclavo hacia el maestro.

⁶SPI (del inglés Serial Peripheral Interface) es un protocolo síncrono que trabaja en modo full duplex para recibir y transmitir información, permitiendo que dos dispositivos puedan comunicarse entre sí al mismo tiempo utilizando canales diferentes o líneas diferentes en el mismo cable. Al ser un protocolo síncrono el sistema cuenta con una línea adicional a la de datos encargada de llevar el proceso de sincronismo.

- CLK (Clock): línea proveniente del maestro encargada de enviar la señal de reloj para sincronizar los dispositivos.
- SS (Slave Select): línea encargada de seleccionar y a su vez, habilitar un esclavo.

De la placa de desarrollo fueron utilizados para esta actividad los pines PTA16, PTA17, PTA15 y PTA14, cumpliendo las funciones MOSI, MISO, CLK y SS respectivamente. A continuación se realizan las configuraciones propias de la memoria volátil necesarias para establecer la comunicación con el micro-controlador.

Lo que resta es escribir la memoria SD. Para poder lograrlo inicialmente se utiliza la función "serialPC_interrupt". Cuando el SIV envía una "T" (o "t") el micro-controlador se interrumpe y comienza a realizar las tareas correspondientes al código provisto, una de ellas consiste tratar de escribir la memoria SD a través de la función "escribirSD". En el momento que el programa intenta escribir datos en la memoria SD podrían presentarse dos tipos de errores, uno de ellos es "Null pointer exception" y el otro "Segmentation fault". El primer error mencionado puede ser tratado de distintas maneras (p.e. utilizando una sentencia "if" o un bloque "try catch") y el segundo no puede ser tratado en C++, es decir que de presentarse este tipo de error el programa colapsaría produciendo el detenimiento del micro-controlador. Con la finalidad de evitar esto último es que inicialmente en "serialPC_interrupt" se llama a la función "archivoExiste" para comprobar si existe el archivo "data.txt" en el cual se escribirán los datos, de no existir el archivo el programa arrojará un "Null pointer exception" error que se trata a través de la sentencia "If". Si surge el error mencionado el programa se encarga de poner en valor alto (1 lógico) el pin correspondiente a la variable auxiliar existente, en este caso se enciende un led rojo representando el surgimiento del error. Si todo funciona correctamente el programa abre el archivo y escribe en él la d.d.p. entre electrodos, la tensión de salida del DAC, la temperatura medida y la hora a la cual fueron almacenados los datos.

4.4.5 Seguimiento solar

Para obtener una explicación detallada del proceso realizado para la obtención del sistema de seguimiento solar remitirse a la sección 8 "Fuente de alimentación alternativa".

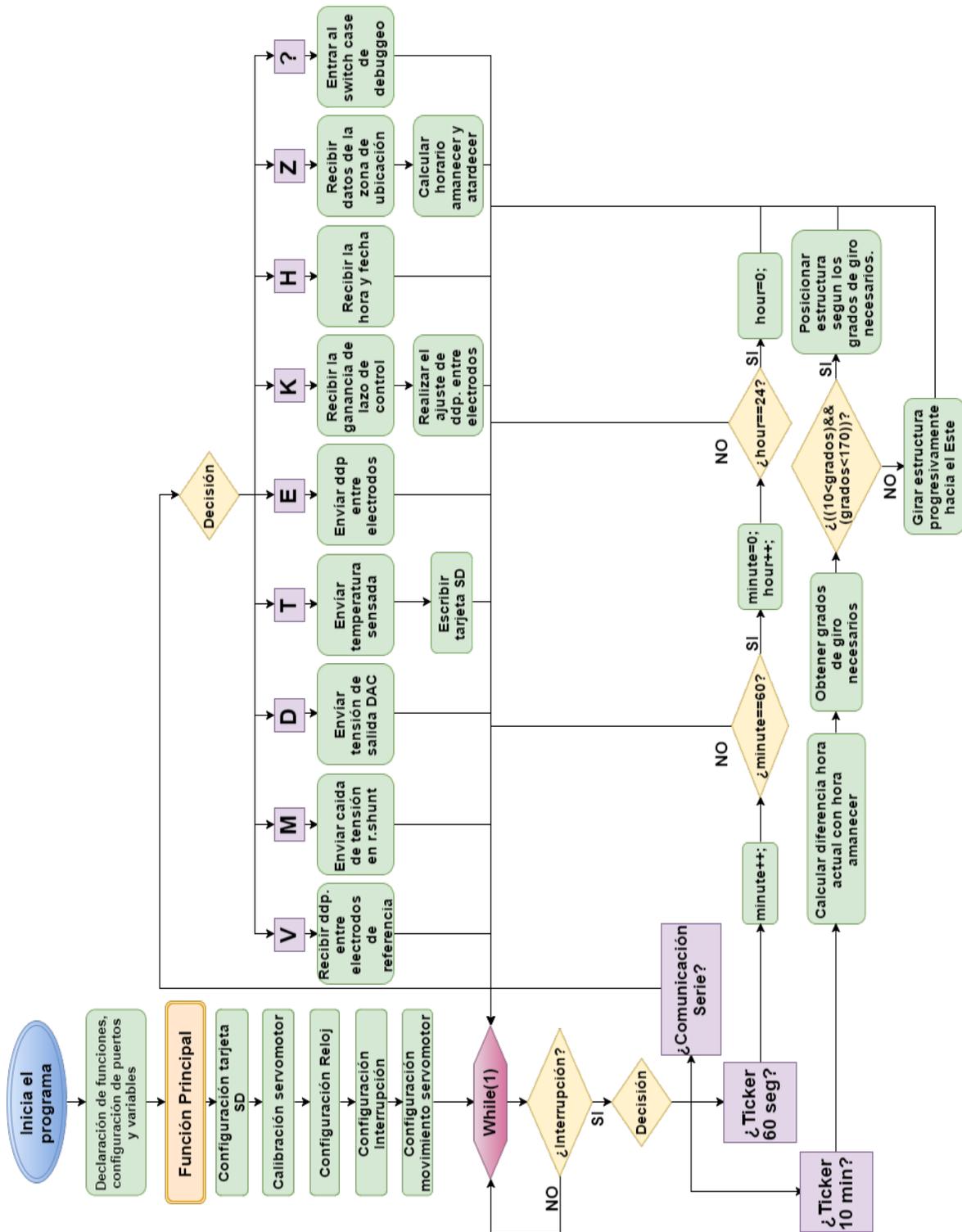


Fig. 4.6 Diagrama de flujo del software embebido en la placa de desarrollo.

CAPÍTULO 5

Instrumentación Virtual

En el presente capítulo se describe el *marco metodológico* referente a las herramientas utilizadas para el desarrollo de la interface del proyecto por computadora. El diagrama completo del programa se puede apreciar en el anexo 3.

5.1 Control y Monitoreo de variables

Para realizar un análisis profundo de los datos y tomar acciones de control sobre el sistema en una interface gráfica simple y agradable, se utilizó el software de instrumentación virtual "LabView" (acrónimo de Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench). Esta herramienta, desarrollada por National Instruments, permite programar mediante un lenguaje gráfico (llamado 'G') en muy alto nivel, a código abierto. Los programas desarrollados en esta plataforma reciben el nombre de "VI's", instrumentos virtuales o *virtual instruments* en inglés. Dentro de estos programas se nuclean los protocolos de comunicación, registro y proceso de datos. Además permite mediante la implementación de "Indicadores" y "Controles", abstraer el desarrollo de la interfaz gráfica a un "*panel frontal*", permitiendo el diseño en tiempo real en simultáneo con el programa en código G. A continuación se explicarán en detalle los módulos principales utilizados en este desarrollo.

5.1.1 Configuración para comunicación UART - VISA

Para realizar la comunicación con la placa de desarrollo, se optó por utilizar comunicación serie asincrónica. LabView cuenta con bloques especializados para ello, permitiendo acceder a los protocolos "COM" de Windows, y configurar fácilmente los parámetros necesarios. En la figura 5.1 se puede observar la apariencia de este bloque:

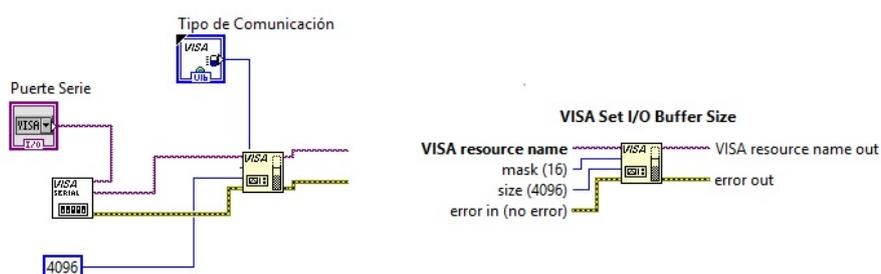
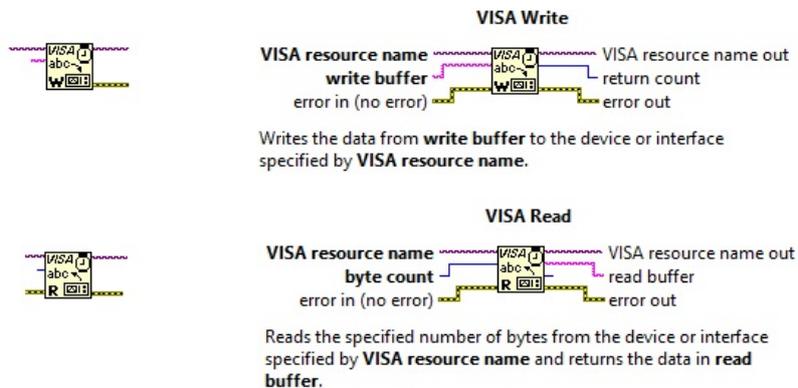


Fig. 5.1 Detalle de la configuración de la comunicación VISA.

La elección del puerto y el tipo de comunicación se realiza en la interfaz gráfica de usuario. Una vez seleccionado un puerto, el mismo constituirá el recurso VISA que utilizará el programa a partir de ese momento. De cambiar el puerto (físico o virtual), el programa deberá ser reiniciado.

5.1.2 Petición y recepción de datos mediante VISA

Para enviar y recibir, se utilizan las funciones "Write" y "Read". Mediante el envío de un carácter (*Write*) o una serie de caracteres de 8 bits desde la aplicación en LabView, el micro-controlador tendrá una rutina encargada de escribir en el buffer a ser leído por el SIV el dato indicado según una pauta previa. Es necesario entender de antemano el tipo de dato que se está pidiendo y el tipo de dato que se pretende leer. Se puede además escribir cadenas de datos a modo de configuración, como se verá en la sección siguiente. La función *Read* por su lado, leerá el dato enviado por el micro-controlador al buffer, y lo asignará a la variable correspondiente en el programa. En la figura 5.2 se puede observar dichas funciones, las cuales solo requieren el recurso VISA previamente configurado y disponible (Abierto).

Fig. 5.2 Detalle de bloques *Read - Write*.

Protocolo de comunicación

Previamente en la sección 4.4.2 se habló acerca del protocolo de comunicación utilizado, sin embargo aquí se presenta nuevamente con un nivel de detalle mayor mediante la siguiente tabla:

Table 5.1 Protocolo de comunicación

Caracteres	Respuesta y tipo (si corresponde)	
'm', 'M'	Tensión de la resistencia Shunt	(float)
't', 'T'	Tensión del sensor de temperatura	(float)
'hxxxxxxxxxxxx'	Ninguna - Configuración de fecha	1
'zxxxxxxxxxxxx'	Ninguna - Config. zona horaria y lugar	2
'd', 'D'	Tensión del DAC	(float)
'kxxxx', 'Kxxxx'	Ejecutar acción de control con la ganancia de lazo xxxx	3
'e', 'E'	Tensión en los electrodos	(float)
'?d', '?D'	Consulta de datos	(String)
'?h', '?H'	Horarios de amanecer y ocaso	(String)
'?z', '?Z'	Zona horaria, latitud y longitud	(String)
'?f', '?F'	Fecha del dispositivo para el movimiento del servo	(String)
'?t', '?T'	Fecha del dispositivo para el cálculo de amanecer-ocaso	(String)
'?a', '?A'	Angulo y ancho de pulso del servo	(String)
'default'	Por defecto, se devuelve el carácter enviado	(char)

5.1.3 Calibración del sensor

Debido a que el conversor analógico digital tiene un offset, es necesario calibrar las mediciones. Esta calibración permite además deshacerse de corrientes parásitas, que no representan valores presentes en la cuba electrolítica. El algoritmo utilizado se implementa únicamente en la medición de la corriente de anodización, la cual es la más crítica. Esto implica que al iniciar el sistema, debe encontrarse abierto el circuito de anodización, una vez calibrado el mismo se puede comenzar a tomar las mediciones. La implementación es a través de la toma de datos en un intervalo determinado a corriente cero⁴, estos datos se promedian obteniendo un valor de corriente "*bias*", el cual se sustrae a las medidas posteriores. Una vez se terminó de tomar las medidas de calibración se avisa que el sistema esta listo para funcionar.

5.1.4 Interpretación de los datos recibidos

Los datos recibidos del sistema embebido correspondientes a mediciones, son interpretados como un dato de tipo *String*. Se implementan bloques de conversión propios de LabView para transformar los datos en tipos *double* como se ejemplifica en la figura 5.3.



Fig. 5.3 Detalle del bloque de interpretación de datos String.

¹Formato aaaammddhhmm, ejemplo: H20171005120000.

²Signo y precisión de un decimal, ejemplo: Z-3.0+55.4-45.6.

³Ejemplo: K0.05.

⁴Tener en cuenta, que la tensión de anodización debe estar configurada en 0.

5.1.5 Presentación de los datos en tiempo real

A medida que se toman datos se presentan en dos gráficos en tiempo real. Uno de los gráficos presenta muestras, promedios, y la interpolación lineal entre muestras (Cuyo único propósito es la mejor visualización de los datos). Los bloques en LabView para estas funciones se denominan "charts". En un gráfico adicional, se presenta la cantidad de gramos anodizados de material en función del tiempo transcurrido, este gráfico no es a tiempo real ya que el tiempo es integrado en los intervalos indicados por el usuario para realizar los cálculos. En la figura 5.4 se puede observar el bloque del programa encargado de graficar los datos en la interface de usuario.

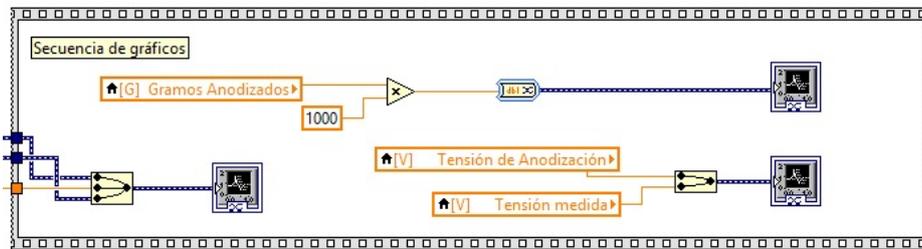


Fig. 5.4 Detalle del bloque de secuencia de gráficos.

Los gráficos de la interfaz de usuario se pueden observar en las figuras 5.5 y 5.6. El tipo de escala se puede modificar en tiempo real, sin importar la configuración por defecto.

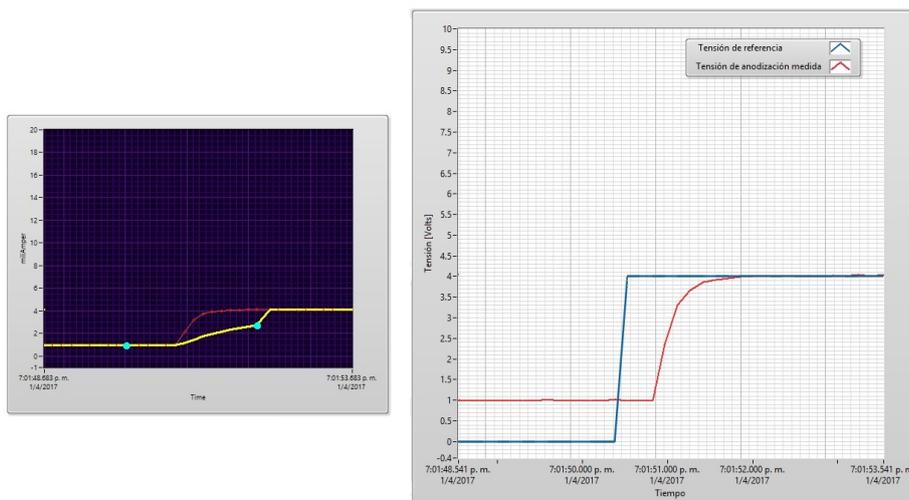


Fig. 5.5 Gráfico corriente - tiempo.

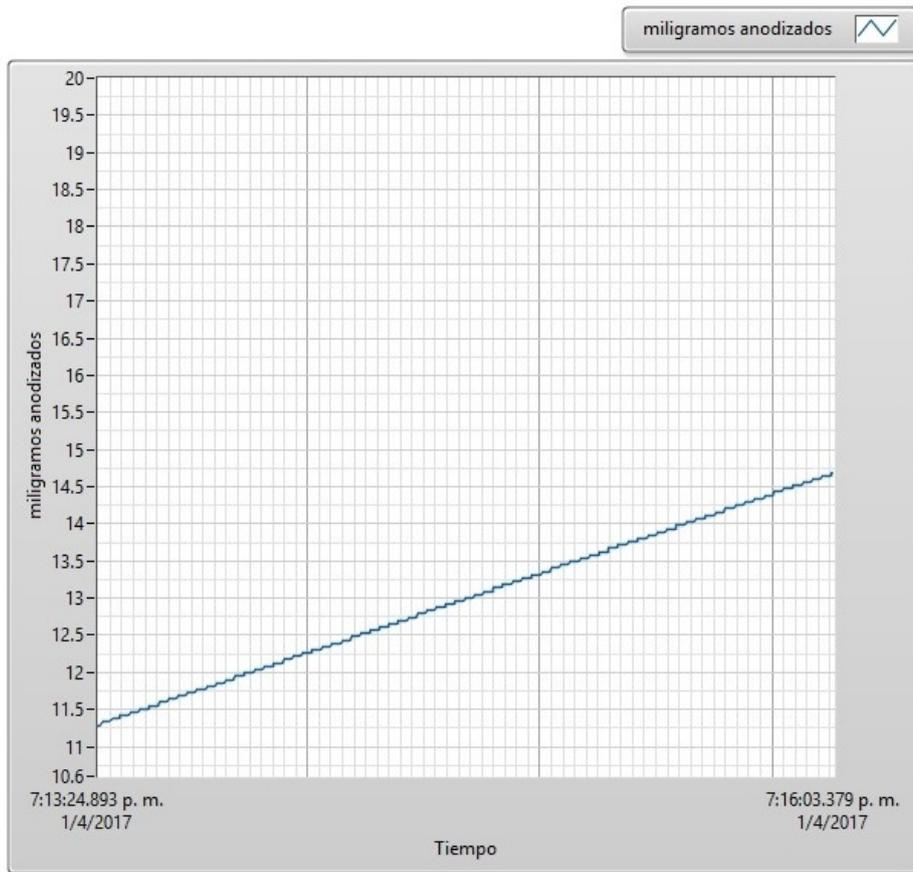


Fig. 5.6 Gráfico gramos anodizados - tiempo.

5.1.6 Análisis estadístico de los datos

El flujo de datos del sistema tiene una velocidad de aproximadamente 1 dato cada 0.1 segundos; es decir que el programa entero tiene un ciclo que dura 100 ms ¹. Este tiempo puede ser variable ya que es dependiente del nivel de proceso de la computadora durante la ejecución, y de la cámara en cuestión. La velocidad de respuesta del embebido es extremadamente rápida comparada con la del programa en LabView (del orden de los micro segundos). Tomando en cuenta las dinámicas del proceso se decidió utilizar promedios de muestras en determinados intervalos de tiempo. Para ello se recurre a las herramientas estadísticas de LabView, con las cuales las muestras individuales se promediarán en el

¹Se debe tener en cuenta el intervalo de toma de imágenes, en el cual el programa entrará en la rutina correspondiente la que se dejarán de tomar datos de mediciones

tiempo. Este intervalo de promedio es indicado por el usuario, y se recomienda un tiempo no menor a dos segundos. En la figura 5.7 se puede apreciar la secuencia encargada del análisis estadístico. El mismo cuenta de un bloque que cronometra el tiempo transcurrido, y mediante una variable de tipo *bool* indica cuando el tiempo indicado transcurrió, reiniciando el cálculo de la media de los valores e indicando que el dato promediado esta disponible. Este mismo intervalo de tiempo se utiliza como intervalo de integración para el calculo de gramos anodizados en el electrodo, y para tomar la medición de la temperatura.

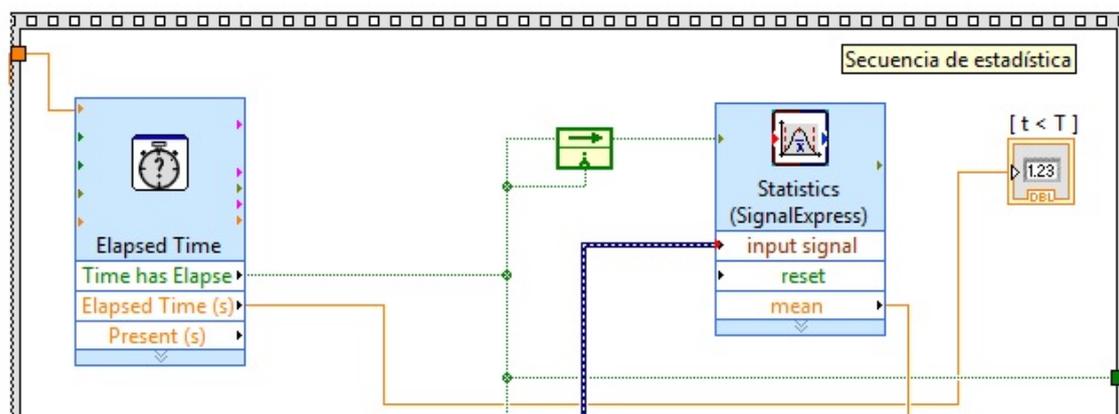


Fig. 5.7 Bloque de análisis estadístico

5.1.7 Exportación de los datos

Con el objetivo de tener los datos de las mediciones disponibles para un análisis posterior, el programa genera un archivo de texto en el que periódicamente añade una fila que contiene una etiqueta de tiempo, y mediciones de corriente, tensión y la temperatura. El bloque que genera este archivo se puede apreciar en la figura 5.8, si bien el archivo implementado es ".txt" se puede utilizar un formato ".xls" (Microsoft Excel) para exportar los datos. Se eligió un archivo de texto simple en ASCII para tener compatibilidad con cualquier sistema operativo.

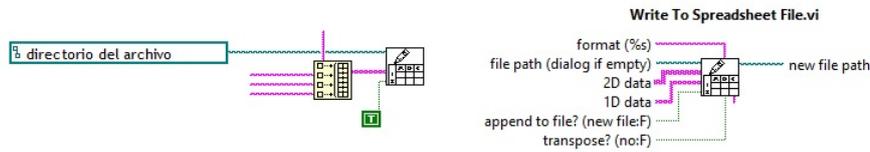


Fig. 5.8 Bloque de registro de datos en un archivo

5.2 Toma de imágenes

Como los procesos a los que está destinado el sistema desarrollado son de dinámica lenta (al menos para los objetivos didácticos que se pretende en parte que tenga el sistema), fue diseñado un módulo de toma de imágenes en el tiempo mediante las cuales se generará un video de tipo *"time lapse"*. Se utiliza una rutina específica en el programa para el módulo, en ella se procede a generar un archivo en formato *".avi"* añadiendo fotogramas en un intervalo indicado por el usuario. Se recomienda alrededor de 30 segundos, y se debe tener en cuenta el retardo en el programa que existe para tomar datos cada que se tome un fotograma desde la cámara. Además fue diseñado un bloque que permite añadir etiquetas al vídeo, como la fecha y hora del fotograma o una etiqueta personalizada por el usuario.

5.2.1 Herramientas utilizadas

El módulo de toma de imágenes está desarrollado en base a las herramientas IMAQ e IMAQdx de National Instruments, actualmente complementos de LabView. Las mismas forman parte de un paquete denominado *"Vision Acquisition Software"* o VAS. Además se utilizan herramientas propias del paquete básico de LabView para determinar el intervalo entre fotogramas y la interfaz de usuario. En la figura 5.9 se puede observar que la rutina es similar a la utilizada para determinar los intervalos de tiempo de promedio para mediciones como se explica en la sección 5.1.6. Además fue agregado un control de usuario para decidir si se requiere o no tomar imágenes, ya que el sistema no necesariamente requiere de tomar fotografías para funcionar. Toda la rutina se encuentra en un bloque condicional que se

ejecuta si transcurrió el tiempo indicado por el usuario y si está seleccionada la opción "Tomar Imágenes".

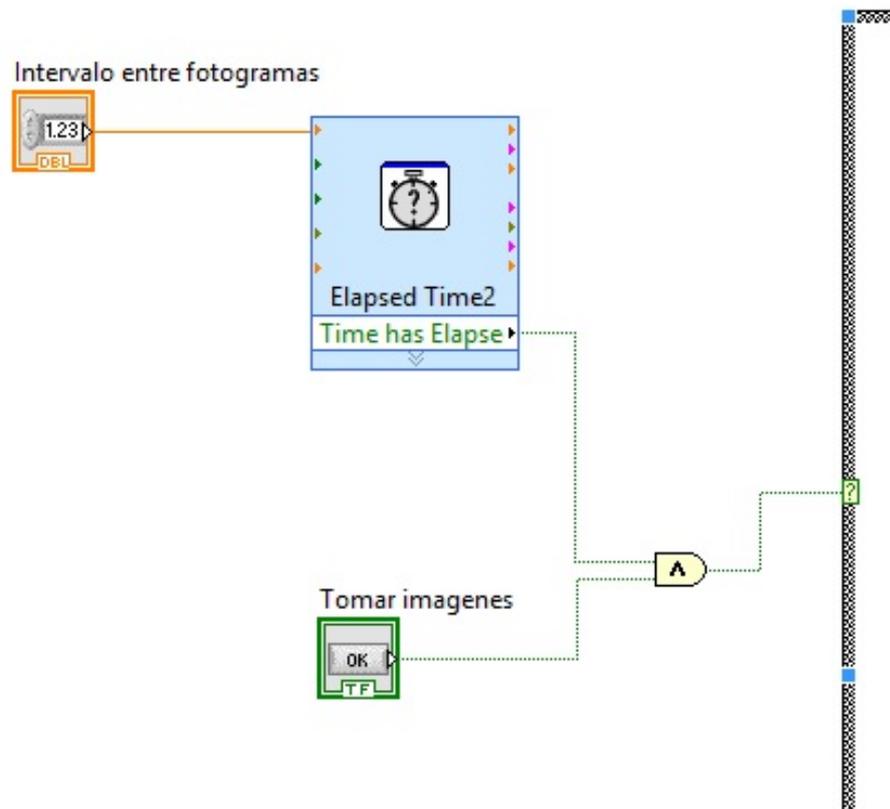


Fig. 5.9 Cronometrado de los fotogramas

5.2.2 Cámara utilizada

Se probó el sistema con tres cámaras de tecnología CMOS:

Table 5.2 Cámaras utilizadas

Marca y Modelo	Características
Genius i300	75g , 8MP Angulo de 100°
Logitech C270	60g , 1280x720 HD 720p
Logitech C525	75g , 1280x720 HD 1080i

Los mejores resultados fueron obtenidos con la cámara *Logitech c525*, la misma requiere un tiempo ligeramente mayor al resto para procesar la imagen pero la calidad es muy superior,

al contar con autofocus no es necesario ajustar la cámara manualmente. Las tres cámaras se pueden apreciar en la figura 5.10.



Fig. 5.10 Cámaras utilizadas, izq: Genius i300, cen: Log. C270, der: Log. C525.

5.2.3 Programación para la toma de imágenes

Para la toma de imágenes en primer lugar se inicia una interfaz con el sistema operativo que obtiene las cámaras con protocolo USB disponibles en el sistema. Una vez seleccionada, se inicia y configura la sesión IMAQ con los bloques correspondientes, y la dirección de la cámara correspondiente. Adicionalmente, se configura el archivo de salida, para el cual se determina una codificación, luego el usuario determina el nombre y directorio del archivo. La codificación elegida se denomina "Microsoft Video 1", y corresponde a archivos de tipo ".avi". En las figuras 5.11 y 5.12 se pueden ver las secciones del programa correspondientes a la toma de imágenes.

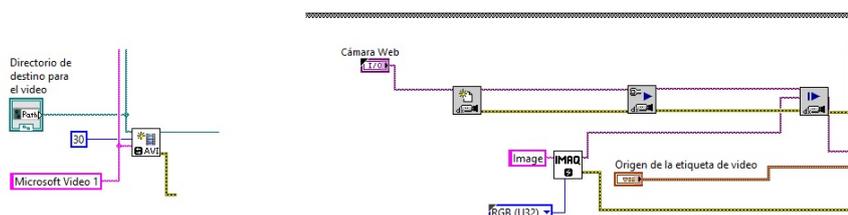


Fig. 5.11 Rutina de configuración de video/IMAQ

Además, en la figura 5.12 se puede observar los bloques correspondientes a la etiqueta sobre el fotograma. Para la misma existe un bloque condicional donde el usuario decide

si desea o no una etiqueta. La etiqueta se plasma sobre un fotograma transparente que se combina con el fotograma obtenido de la cámara, para luego ser añadido al vídeo completo. El último fotograma completo (Imagen y etiqueta) se puede observar en la interfaz de usuario mientras el programa se está ejecutando.

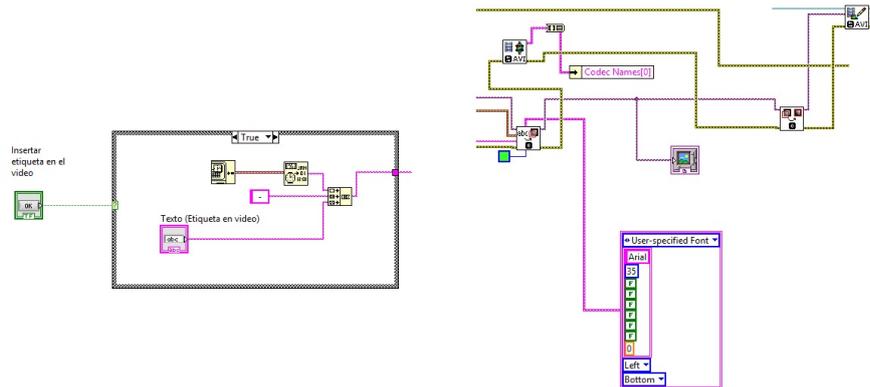


Fig. 5.12 Rutina para etiquetas de video.

5.3 Cálculos para la anodización

El programa incluye una aplicación simple que permite a través de la Ley de Faraday determinar los gramos de material anodizado durante el avance del proceso:

$$\text{Material anodizado (gramos)} = \frac{I(\text{amperios}) \times T(\text{segundos})}{96500} \times \frac{M(\text{gramos/mol})}{n(e/\text{ion})}$$

Para obtener la corriente por el tiempo, se utiliza un algoritmo de integración. Este algoritmo toma el intervalo de tiempo indicado como tiempo entre promedios para la integración, los gramos por mol y la valencia del elemento son ingresadas por el usuario. Existe un bloque que acumula los gramos de material anodizados ciclo a ciclo, por lo que si se cambian los electrodos o se modifica la sustancia, se debe reiniciar el sistema para volver a cero la medición. En la figura 5.13 se puede observar el algoritmo utilizado para la aplicación. Además, en la figura 5.6 se puede apreciar el ya mencionado gráfico de

gramos anodizados a través del tiempo. Cabe destacar que la integración aproxima a una función lineal las mediciones en un intervalo de tiempo, dadas las dinámicas del proceso la aproximación es lo suficientemente precisa; pero si se toman intervalos de tiempo muy grandes para la integración la aproximación pierde validez. Por ello se recomienda que los intervalos de promedio (Tiempo utilizado también como intervalo de integración) no superen los 10 segundos. A los efectos de facilitar la implementación del programa estos valores, y otros que se mencionarán oportunamente, están determinados por defecto.

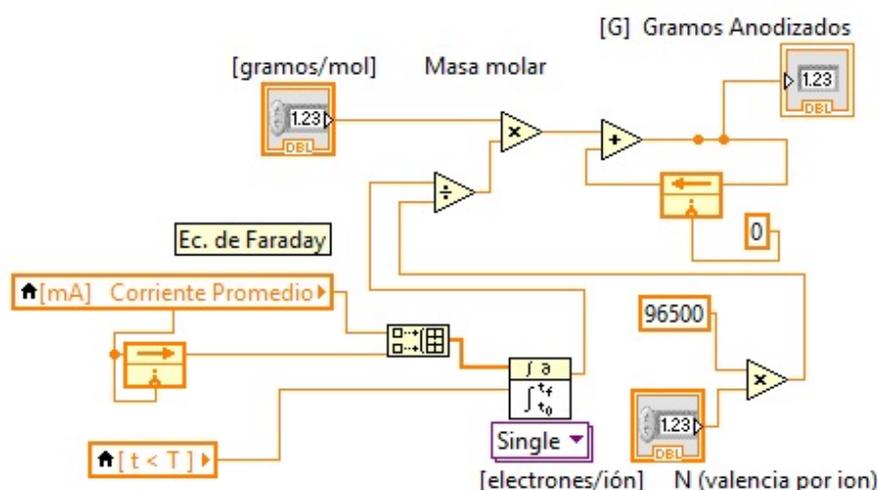


Fig. 5.13 Algoritmo para la aplicación de la ec. de Faraday.

5.4 Monitoreo de actividad del programa

Para realizar un seguimiento del estado actual del programa, además de los posibles errores y su manejo recomendado, se diseñó un sistema de registro de sucesos o "Log" (Como es conocido por sus siglas en inglés). El sistema consiste en registrar datos de utilidad en una variable específica de tipo String, la cual puede ser visualizada en tiempo real mediante la interfaz de usuario. Para simplificar el uso se programó un "SubVi" con dos entradas y una salida. Este bloque añade a la variable indicada en su primer entrada, la variable de tipo String indicada en la segunda entrada, añade automáticamente una etiqueta de tiempo y almacena ambos datos concatenados en la variable indicada en la salida. Su uso está indicado

con la misma variable en la primer entrada y la salida, de modo que la variable "Log" sea permanentemente actualizada y presentada. El bloque y su contenido se pueden apreciar en la figura 5.14.

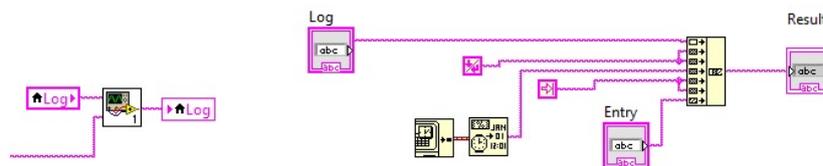


Fig. 5.14 Vista del SubVi "LOG" y su contenido.

A medida que transcurre el programa, se realizan entradas en el registro que indican la acción específica del algoritmo en ese momento, el programa está diseñado de modo que al finalizar una rutina correctamente exista una entrada en el registro que indique que el algoritmo se ejecutó satisfactoriamente, o advertir al usuario de medidas importantes en referencia al uso del sistema. Un ejemplo de esto se puede observar en la figura 5.15.

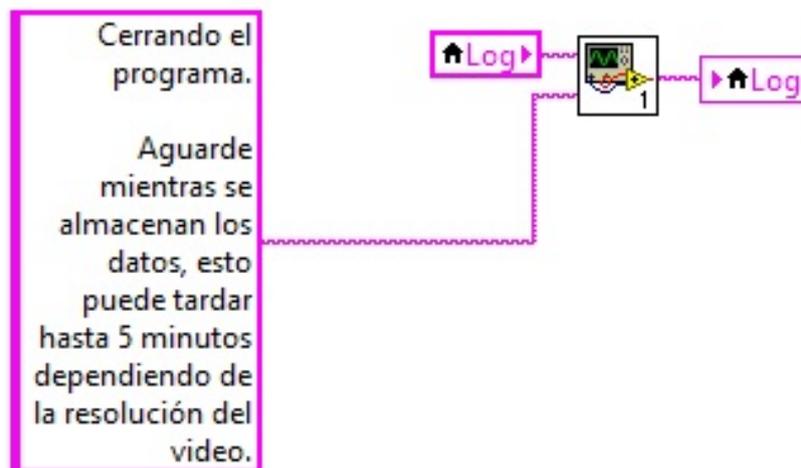


Fig. 5.15 Ejemplo de entrada en el LOG.

5.5 Manejo de errores

En general, el manejo de errores del programa se basa fuertemente en el bloque estándar que LabView contiene para estos manejar eventos de tipo "Error", este bloque se muestra en la figura 5.16.

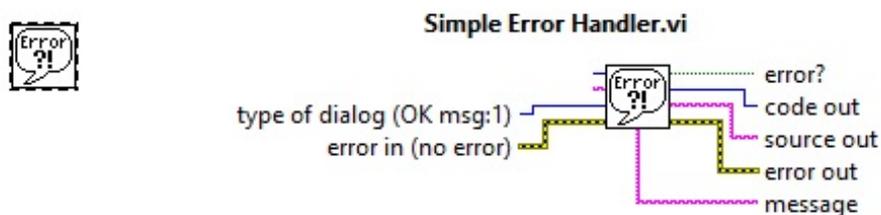


Fig. 5.16 "Simple error Handler."

El programa ejecuta cada una de las grandes secuencias que lo componen con un manejo de errores por cada una. El manejo de errores puede detener el programa o no de acuerdo a la criticidad del error, pero en todos los casos registra el suceso en el registro ("*Log*"), y advierte al usuario junto con medidas que este puede tomar para solucionarlo. En problemas de comunicación, por ejemplo, se dará un lapso de tiempo para solucionar el problema y el programa reintentará la conexión. El bloque de manejo simple de errores ("*simple error handler*"), genera una variable de tipo "*bool*" que adquiere un valor positivo de existir error, y negativo de no existir error. Aprovechando esto, a lo largo del programa se utilizó un bloque de control de ejecución condicional, el cual ingresa un mensaje en el registro en caso de eventos con error y eventos sin error. El mismo se muestra en la figura 5.17.

En todos los casos, debido a que los mensajes de error generados automáticamente por LabView contienen información difícil de interpretar para un usuario sin conocimiento, se evita desplegar una ventana y se utiliza el bloque de visualización del Log en la interfaz. Además, cada bloque de manejo de error indica en la interfaz mediante un indicador de tipo "LED" que se detectó un fallo en el programa. Se pretende que el usuario consulte el Log para determinar el origen de la falla y tomar medidas.

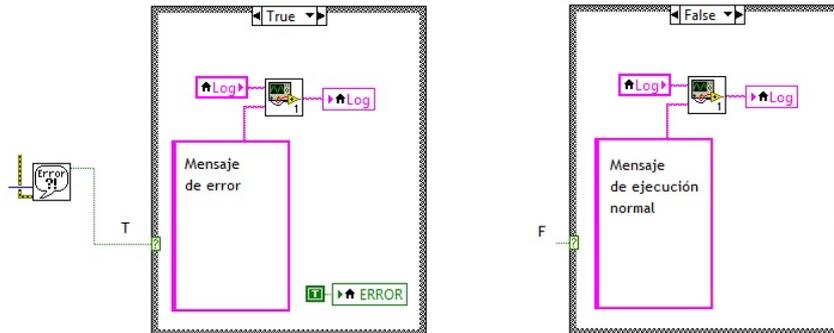


Fig. 5.17 Manejo de eventos con error (izq) y sin error (der).

5.6 Interfaz de usuario

La interfaz de usuario definitiva para el programa, consta de un sistema de pestañas con distintos usos cada una. Esto permite que la ventana sea cómoda y simple de utilizar. Además de la función de cada una de las pestañas es posible desplegar un gráfico para el monitoreo de la tensión de anodización, el cual se activa desde la pestaña "Mediciones" y es visible en un cuadro por separado. Las funciones específicas de cada control o indicador en relación al proceso serán explicadas en secciones posteriores y anexos, el objetivo de esta sección se centra en presentar únicamente la interfaz gráfica y sus secciones. Se presentarán las pestañas una a una:

5.6.1 Pestaña "Mediciones"

Esta pestaña incluye los indicadores más cruciales, junto con un gráfico de "Corriente de anodización - Tiempo". Además permite desplegar el gráfico de "Tensión de anodización/referencia - Tiempo". Se listan los componentes de la pestaña y su uso:

En la figura 5.18 se puede observar el aspecto de la pestaña. Cabe destacar que el programa inicia por defecto en esta pestaña, por lo que es la primer pestaña con la que se encuentra el usuario.

Table 5.3 Componentes de la pestaña "Mediciones"

Componente	Uso
Control "Tension de anodización"	Control para referencia del proceso
Indicador "Tension medida"	Indicador de variable de proceso
Indicador "Temperatura"	Indicador de variable de proceso
Indicador "Corriente Promedio"	Indicador de variable de proceso
Indicador "Tensión de Control"	Indicador de acción de control del proceso
Indicador "Error"	Indica un error en el programa
Indicador "Calibrando"	Indica cuando el programa se encuentra en calibración
Indicador "Ready"	Indica cuando el programa se encuentra listo para comenzar las mediciones
Control "Start"	Da inicio al programa
Control "Stop"	Detiene inmediatamente el programa
Control "Fecha verde"	Despliega el gráfico Tensión-tiempo
Gráfico "Corriente-tiempo"	Indicador de variable de proceso

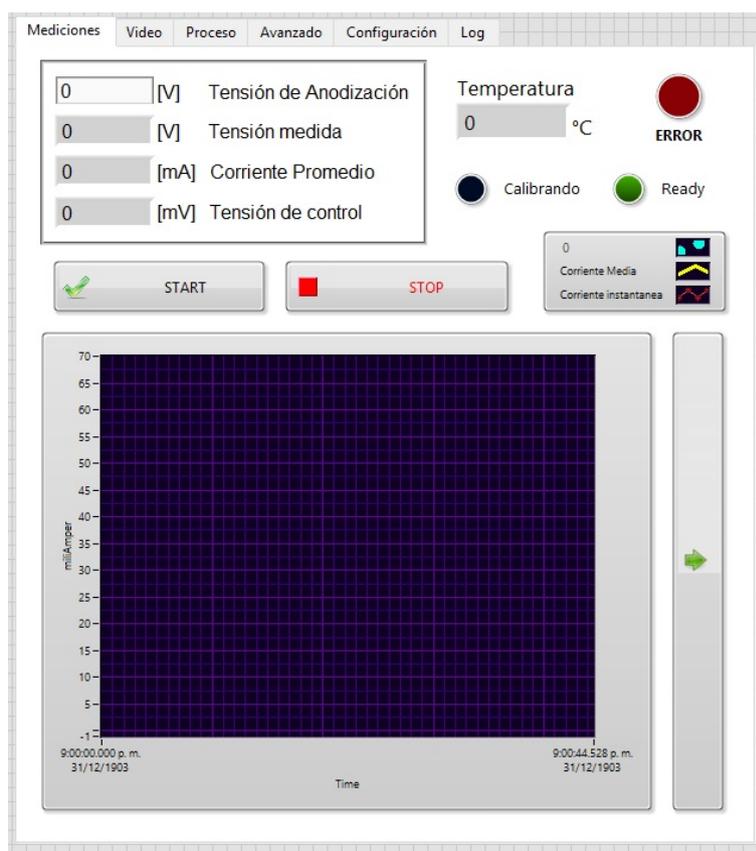


Fig. 5.18 Pestaña "Mediciones".

5.6.2 Pestaña "VÍdeo"

En esta pestaña es posible decidir sobre la toma de imágenes con la cámara, y observar el ultimo fotograma tomado. Se listan los componentes y su uso:

Table 5.4 Componentes de la pestaña "VÍdeo"

Componente	Uso
Control "Tomar imagenes"	Da inicio a la toma de imágenes
Control "Insertar etiqueta"	Controla la inserción de la etiqueta en el vídeo
Control "Texto (Etiqueta...)"	Ingreso para la etiqueta de texto
Control "Tomar imagenes"	Da inicio a la toma de imágenes
Control "Directorio"	Selección de directorio para el vídeo
Indicador gráfico	presenta el ultimo fotograma tomado

En la figura 5.19 se puede visualizar esta pestaña.

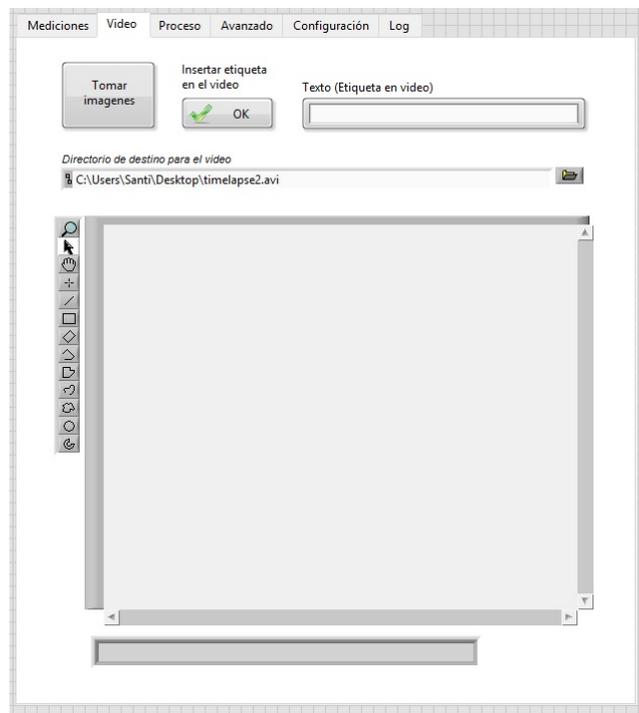


Fig. 5.19 Pestaña "Video".

5.6.3 Pestaña "Proceso"

En esta pestaña se puede visualizar la masa del ánodo según la ecuación de Faraday, controlando la valencia del elemento y los moles. A continuación se listan los componentes y su uso.

Table 5.5 Componentes de la pestaña "Proceso"

Componente	Uso
Indicador "dt de integración"	indica el estado del intervalo de integración
Indicador "Gramos Anodizados"	indica los gramos anodizados
Control "N (valencia...)"	Control de variable del proceso
Control "Masa molar"	Control de variable del proceso
Indicador gráfico	grafica gramos anodizados en el tiempo

En la figura 5.20 se puede apreciar la pestaña en cuestión.

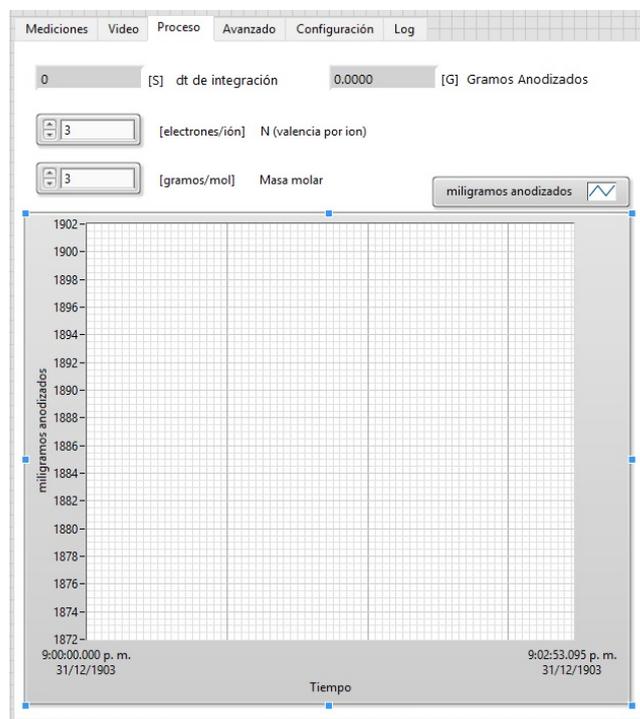


Fig. 5.20 Pestaña "Proceso".

5.6.4 Pestaña "Avanzado"

En esta pestaña se pueden monitorear variables mas complejas. Además cuenta con una tabla de valencias para consultar, y un gráfico de ganancias criticas en el sistema. Se listan los componentes y su uso:

Table 5.6 Componentes de la pestaña "Avanzado"

Componente	Uso
Indicador "Tensión verdadera"	indicador de variable del proceso
Indicador "Calibración (Offset)"	indicador de variable del proceso
Indicador "Offset utilizado"	indicador de variable del proceso
Indicador "Corriente instantanea"	indicador de variable del proceso
Control "K lazo..."	Control critico para el proceso

El K del lazo del control solamente debe ser modificado por un usuario que conozca las consecuencias que esto puede traer en el sistema electrónico.

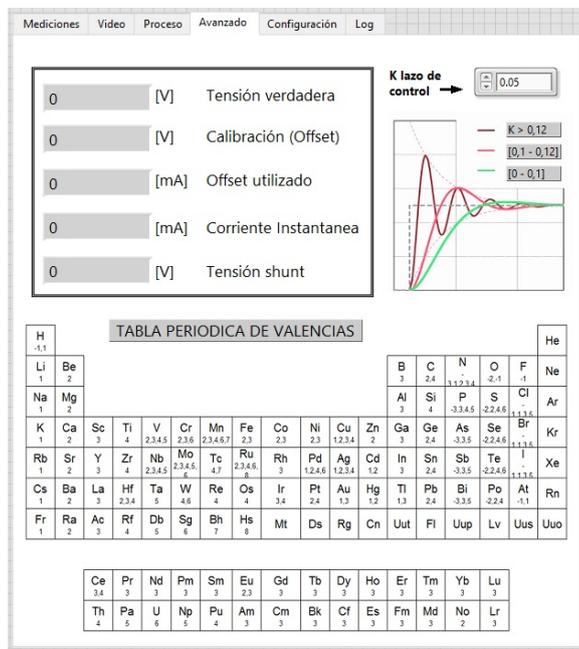


Fig. 5.21 Pestaña "Avanzado".

5.6.5 Pestaña "Configuración"

En esta pestaña se configuran distintos aspectos del programa, como pueden ser la ubicación del dispositivo, el puerto de comunicación, opciones de depuración (*debug*), etc...

Table 5.7 Componentes de la pestaña "Configuración"

Componente	Uso
Control "Tipo de Comunicación"	Control de tipo de comunicación UART
Control "Puerto serie"	Selección del puerto de comunicación
Control "Zona Horaria"	Control de constante para el programa
Control "Latitud"	Control de constante para el programa
Control "Longitud"	Control de constante para el programa
Control "Sensibilidad del sens."	Control de constante del sistema
Control "T de promedio"	Control de constante para el programa
Control "Origen de la etiqueta.."	Control de constante para el vídeo
Control "Directorio del archivo"	Directorio para el archivo con las mediciones
Control "Intervalo entre fotogramas"	Control de constante para el programa
Control "Cámara Web"	Selección de cámara en el sistema operativo
Control "debug1"	Opción de depuración (Avanzado)
Control "debug2"	Opción de depuración (Avanzado)
Control "debug3"	Opción de depuración (Avanzado)

En la figura 5.22 se puede visualizar la pestaña en cuestión.

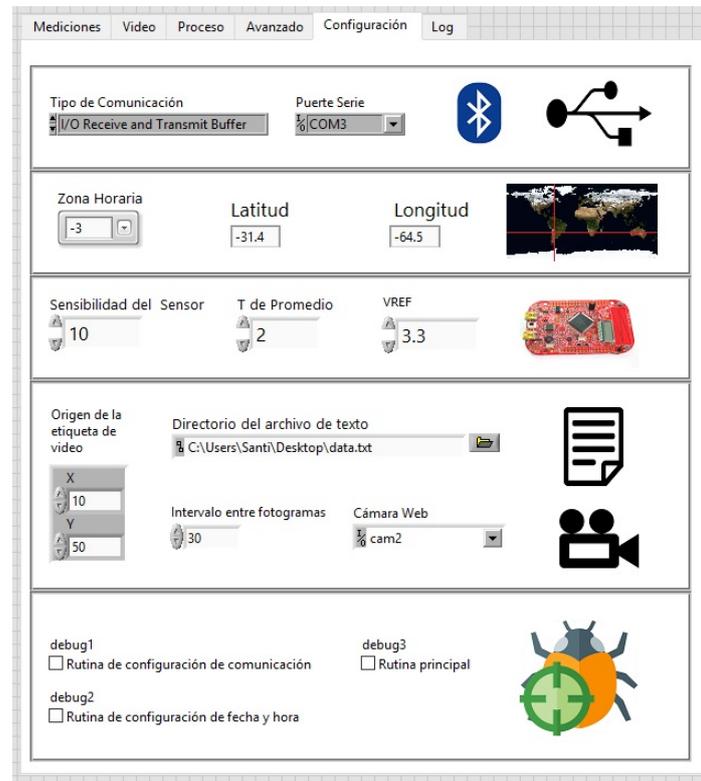


Fig. 5.22 Pestaña "Configuraciones".

5.6.6 Pestaña "Log"

En esta pestaña se despliega el registro de actividad del programa. El único componente de la pestaña es un cuadro de texto, del cual se puede copiar el registro al porta papeles de Windows. En la figura 5.23 se puede visualizar la pestaña en cuestión.

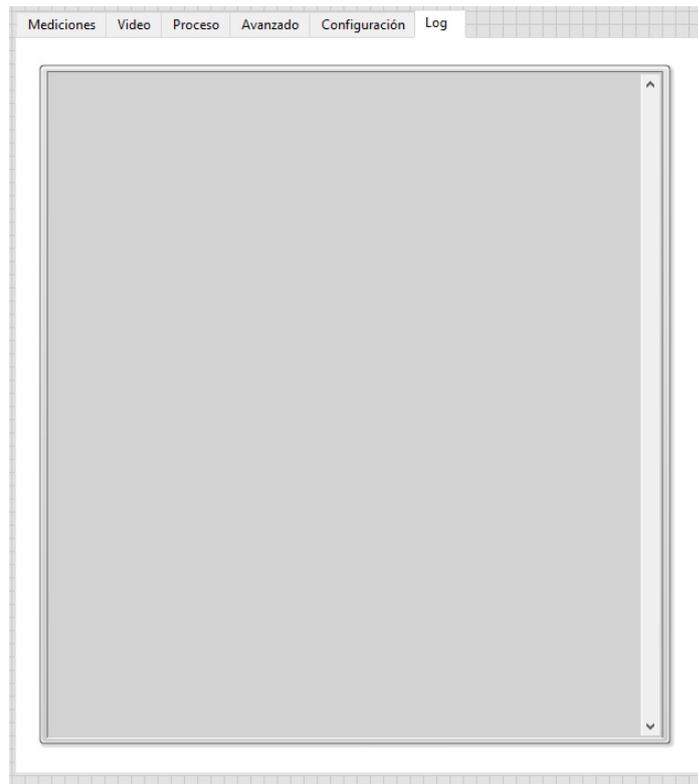


Fig. 5.23 Pestaña "Log".

5.7 Variables

5.7.1 Consideraciones preliminares

LabView asigna automáticamente una variable a cada control o indicador. En el caso de los controles, el tipo de la variable se define cuando se construye el control, en el caso de los indicadores, el tipo queda definido de acuerdo a la variable conectada a su entrada. En el programa desarrollado se utilizaron alrededor de 40 variables. Las más relevantes listarán en la siguiente sección. Es importante mencionar que LabView no hace distinciones entre variables numéricas al momento de definir un control o un indicador, sino que define el tipo de variable según la cantidad de bits requeridos, el ingreso una constante por parte del usuario, o las operaciones que se llevan a cabo con la variable a lo largo del programa.

5.7.2 Variables del programa

A continuación se listan las variables involucradas en el programa. No están incluidas variables complejas como "Charts" o Graphs, las cuales están relacionadas a los gráficos del programa.

Table 5.8 Variables del programa de instrumentación virtual

VARIABLES	Tipo	Uso y significado
N (valencia por ion)	Numérica	Define la valencia del ion a anodizar
Masa molar	Numérica	Define la masa molar del ion presente
Calibrando	Bool	Indica que el sistema se encuentra en proceso de calibración
Ready	Bool	Indica que el sistema se encuentra calibrado para tomar mediciones
ERROR	Bool	Indica que hubo un error o excepción en el sistema
Cámara Web	Etiqueta	Determina la cámara web a utilizar, según una etiqueta asignada automáticamente
Directorio de destino para el video	Directorio	Determina el destino del timelapse
Directorio del archivo de texto	Directorio	Determina el destino del archivo de texto con las mediciones
Extender	Bool	Determina si el gráfico de tensión en tiempo debe ser visible
Insertar etiqueta en el video	Bool	Determina si el usuario necesita o no que se inserte la etiqueta en el video
Intervalo entre fotogramas	Numérica	Determina el intervalo de tiempo en segundos entre fotogramas
K lazo de control	Numérica	Determina la ganancia de lazo para el sistema de control de tensión de anod.

Table 5.9 Variables del programa de instrumentación virtual

Latitud	Numérica	Determina la latitud del lugar donde está instalado el sistema
Log	String	Registro de actividad del programa
Longitud	Numérica	Determina la longitud del lugar donde está instalado el sistema
Origen de la etiqueta del video	Numérica (2D)	Determina la posición inicial de la etiqueta de texto en el fotograma del video, en coordenadas (X,Y)
Puerto Serie	Etiqueta	Determina el puerto con el cual se realizará la comunicación
START	Bool	Determina el inicio del programa una vez abierto el mismo
Sensibilidad del Sensor	Numérica	Determina el valor de la resistencia en Ohms calibrada para medir la corriente
T de Promedio	Numérica	Determina el valor en segundos del intervalo de mediciones a promediar
Temperatura	Numérica	Indica la temperatura medida en el sensor
Texto (Etiqueta en video)	String	Determina la etiqueta a colocar en el video
Tipo de comunicación	Etiqueta	Determina el tipo de comunicación a realizar con la UART
Tomar imagenes	Bool	Determina si el usuario necesita o no tomar imágenes

Table 5.10 Variables del programa de instrumentación virtual

VREF	Numérica	Determina el valor de referencia del ADC en el sistema embebido
Zona Horaria	Numérica	Determina la zona horaria del lugar donde se encuentra instalado el sistema
[t <T]	Numérica	Indica, en segundos, el momento actual dentro del intervalo entre promedios
[G] Gramos Anodizados	Numérica	Indica (según la ecuación de Faraday) la cantidad de material anodizado
[V] Calibración (Offset)	Numérica	Indica el Offset medido en el ADC
[V] Tensión Verdadera	Numérica	Indica la tensión real de referencia de control
[V] Tensión de Anodización	Numérica	Determina la tensión de anodización deseada por el usuario
[V] Tensión medida	Numérica	Indica la tensión medida a electrodos, la cual se realimenta para el control a lazo cerrado.
[mA] Corriente instantánea	Numérica	Indica la corriente medida en el ciclo actual del programa
[mV] Tensión de control	Numérica	Indica el valor de tensión del DAC (actuador en el sistema de control)
debug1, debug2, debug3	Bool	Determinan si ejecutar o no el proceso de depuración indicado en la etiqueta
stop	Bool	Determina si el programa debe o no continuar finalizado el ciclo actual

5.8 Funciones y consideraciones adicionales

5.8.1 Límites de tensión y consideración dinámica de caída de tensión en el sensor

Dentro del programa existe una rutina de comprobación para la tensión de anodización ingresada. Este límite es inherente a la construcción del circuito electrónico y no puede ser modificado por el usuario. Esta función evita que el sistema pueda tener una referencia de tensión inalcanzable por el circuito. Además, en la misma secuencia, se toma en consideración la caída de tensión en el sensor de corriente; como se verá en capítulos posteriores las mediciones de corriente requieren que haya una caída de tensión que dependerá de la impedancia del sensor, por lo que se considera de forma dinámica esta caída en función de la corriente circulante y la impedancia medida del sensor (Resistencia calibrada). De modo que ciclo a ciclo, se realimenta la medición de corriente y se calcula la tensión que cae en el sensor; esto implica que el valor que se informa al sistema embebido como tensión de referencia "*setpoint*" es en realidad mayor al valor ingresado por el usuario. Al considerar la caída en el sensor, la tensión a electrodos es efectivamente la que el usuario pretende a electrodos, de otro modo la tensión de anodización controlada sería menor a la necesaria. En la figura 5.24 se muestra el bloque de programa correspondiente.

5.8.2 Calibración del Offset

Para calibrar el offset de la medición de tensión en la resistencia Shunt, el programa toma muestras durante dos periodos de promedio, tiempo durante el cual el indicador "Calibrando" permanecerá encendido y el indicador "Ready" apagado. El bloque en cuestión se puede apreciar en la figura 5.25.

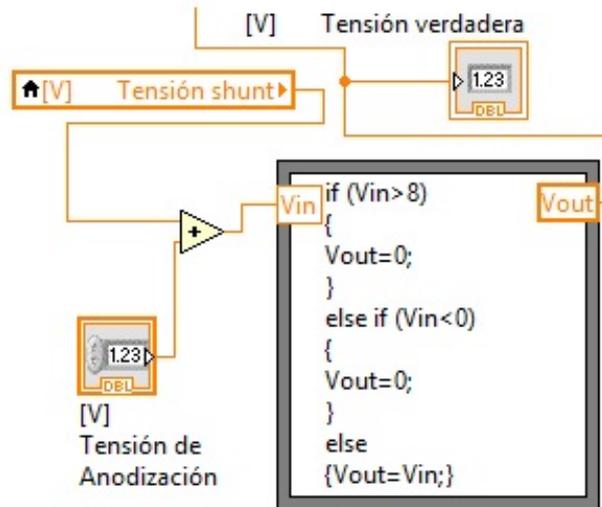


Fig. 5.24 Comprobación y ajuste de tensión ingresada.

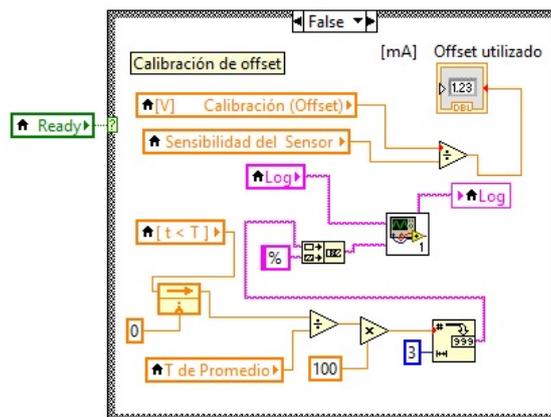


Fig. 5.25 Bloque de calibración del offset.

5.8.3 Depuración del programa

Existen tres opciones de depuración en la pestaña "Configuraciones", estas opciones deshabilitan grandes bloques de código según indica la etiqueta de cada una. El objetivo es ignorar secciones que pueden estar fallando para que el programa pueda ejecutarse hasta el final, dejando de lado ciertas funcionalidades del mismo. Si bien son opciones de uso avanzado, permiten por ejemplo, comenzar el proceso del sistema sin funcionalidades

avanzadas como la de seguimiento solar de las celdas fotovoltaicas (Característica del sistema que se describirá en capítulos posteriores).

5.8.4 Tiempo de espera para la UART -*Timeout*

Ante un pedido de datos por UART, el programa esperará una respuesta del sistema embebido durante 20 segundos, tiempo después del cual ocurrirá una excepción de tipo "*timeout*", resultando en un error de comunicación. El tiempo de espera no puede ser modificado por el usuario; durante las pruebas del sistema se observó que los tiempos de respuesta del sistema embebido nunca superan los 10 segundos, siendo este último caso una excepción muy rara de la tarjeta de memoria.

5.8.5 UART - *Bluetooth*

El programa no hace distinción del origen de los datos del puerto *COM* seleccionado. Las pruebas por bluetooth fueron satisfactorias pero debe tenerse en cuenta las posibles fuentes de interferencia que pueden afectar la transmisión de datos, puesto que sistemas operativos de baja velocidad o sobrecargados pueden tomar mas de 20 segundos en solventar un problema de desacople con el dispositivo embebido, resultando en un error de *timeout* como el que se describe en la subsección 5.8.4. En este caso el sistema embebido seguirá funcionando con la última tensión de anodización configurada pero no habrá transmisión de datos desde y hacia el programa en la computadora. Se recomienda una velocidad de 9600 baudios para la comunicación.

5.8.6 Apertura y cierre de la sesión VISA

Por defecto, el programa cierra la sesión con el puerto COM de Windows ante un error o cierre inesperado del mismo. Sin embargo, el método correcto de cierre del programa es presionando el control de "Stop" en el panel principal.

5.8.7 Compilación del video o "timelapse"

El vídeo generado contiene 24 fotogramas por segundo. Al detener el programa, se compila el vídeo compuesto de los fotogramas tomados a lo largo del proceso. El tiempo de compilación depende de los recursos disponibles en el sistema operativo, y de la calidad de la cámara utilizada. Las pruebas con una cámara CMOS "Full HD" con tomas cada 10 segundos, durante 4 horas, resultaron en un tiempo de compilación de 4 minutos con una computadora de doble núcleo a 1.6 GHz. El usuario es notificado en el LOG al detener el programa, de la demora que puede enfrentar para la compilación del vídeo. Otro detalle a destacar, es que es posible detener la toma de imágenes y retomarla en cualquier momento, siendo el único efecto un lapso de tiempo en el cual no habrá imágenes.

5.8.8 Programa completo e instructivo de uso

El programa completo se puede consultar en el anexo 3. El instructivo de uso se desarrolla en el capítulo 11.

5.9 Flujo de ejecución del programa

A continuación se resumirá el flujo de ejecución normal del programa.

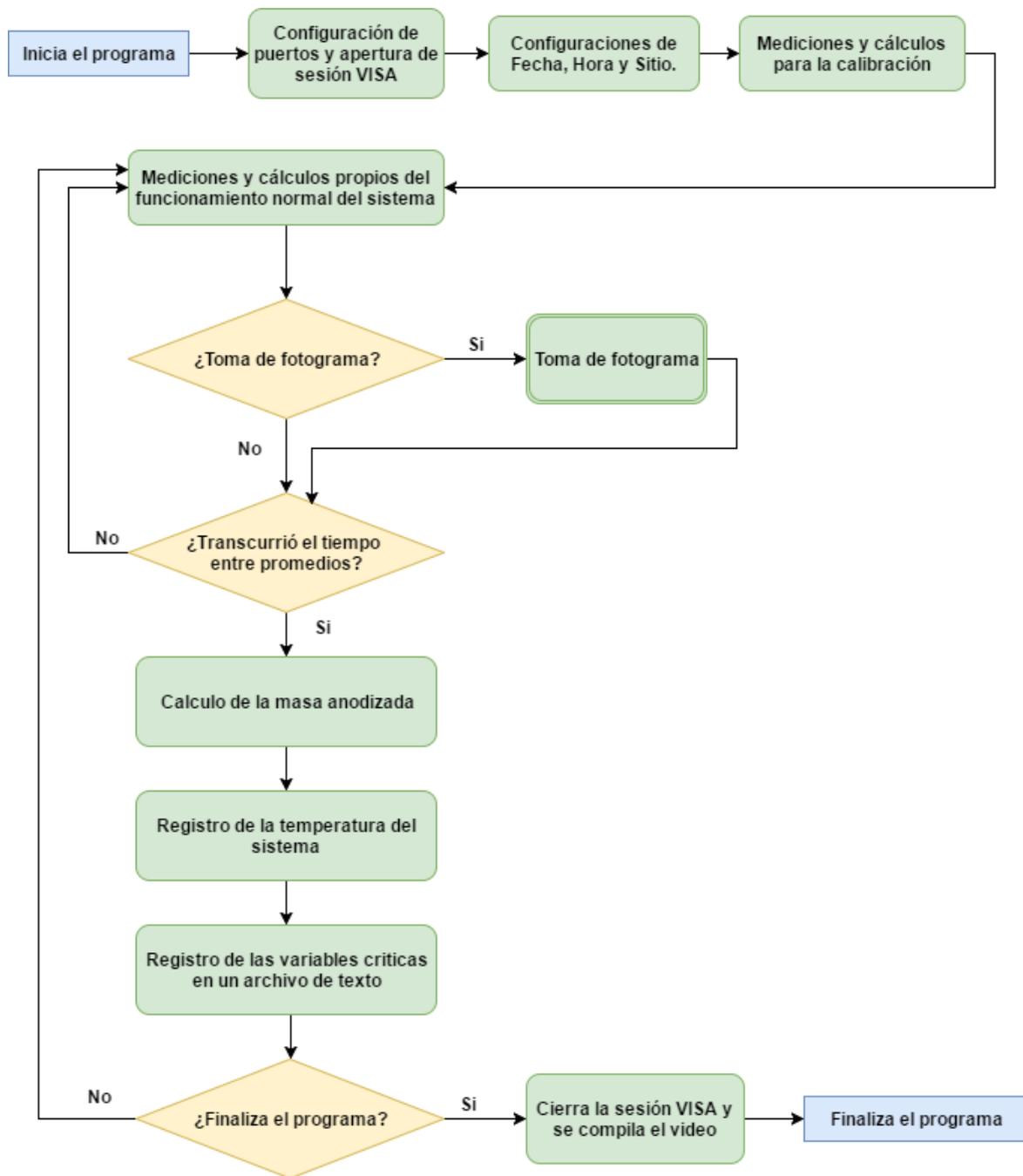


Fig. 5.26 Diagrama de flujo del programa en ejecución normal.

1	INICIA EL PROGRAMA
2	Inicialización de las variables claves - Se espera que el usuario presione 'START'
3	Inicialización del LOG con información para el usuario
4	Configuración de la comunicación serie
5	Se comunica la fecha y hora del sistema al dispositivo embebido
6	Se comunican latitud, longitud y zona horaria al disp. embebido
7	Configuración del timelapse, tipo de vídeo y directorio
8	Se comunica la tensión de anodización '0V' al dispositivo embebido
9	Se solicita la tensión de control al embebido y se realiz. los calculos necesarios
10	Se solicita la tensión de anod. al embebido y se realiz. los calculos necesarios
11	Se solicita ejecutar la acción de control en el embebido con el 'K' indicado
12	Se solicita la tensión de la resistencia shunt y se realizan los cálculos necesarios para determinar la corriente
13	Se promedia el valor de corriente con los valores anteriores
14	se almacena el ultimo valor promediado como valor de Offset
15	Si transcurrieron "T de promedio" Segundos se prosigue con el programa, de lo contrario, se regresa al punto 8
16	Finaliza la calibración. Se reinicia el promedio
17	Se comunica la tensión de anodización deseada al dispositivo embebido
18	Se solicita la tensión de control al embebido y se realiz. los calculos necesarios
19	Se solicita la tensión de anod. al embebido y se realiz. los calculos necesarios
20	Se solicita ejecutar la acción de control en el embebido con el 'K' indicado
21	Se solicita la tensión de la resistencia shunt y se realizan los cálculos necesarios para determinar la corriente
22	Se promedia el valor de corriente con los valores anteriores
23	Se grafican los valores obtenidos hasta ahora en el programa

24	Si transcurrieron "T de promedio" Segundos se prosigue con el programa, de lo contrario, se regresa al punto 17
25	Se almacenan los valores críticos en el archivo correspondiente
26	Se toman mediciones de temperatura
27	Se calculan y grafican los gramos anodizados
28	Se grafica el valor de la corriente promedio
29	Si transcurrió el tiempo entre fotogramas, se toma la imagen de lo contrario continua el programa
31	Si la variable "Stop" continúa en "False" se regresa al punto 17 de lo contrario inicia la rutina de finalización del programa
33	Finalización del programa
34	Se cierra la sesión VISA
35	Se compila el timelapse
36	FINALIZA EL PROGRAMA

CAPÍTULO 6

Prototipo de cuba electrolítica

En este capítulo se expondrá brevemente el *marco metodológico* en referencia al diseño y construcción del prototipo de cuba electrolítica.

6.1 Parámetros preliminares

Al tratarse de un prototipo con objetivos didácticos que pueda utilizarse para pruebas de campo, se tuvo por requerimiento que el mismo sea pequeño, robusto, resistente a la corrosión, hermético y que permita la visualización del proceso así como también la toma de muestras en el seno de la solución.

6.1.1 Materiales utilizados

En cuanto a los materiales utilizados, se englobarán los mismos en dos grupos: Aquellos en contacto con la solución durante el proceso y aquellos que son externos al mismo (no entran en contacto con la misma en ningún momento).

Materiales de soporte en contacto con la solución

Debido a los que estos materiales no deben afectar a la solución o a el proceso al que se somete la misma, debían contar con la menor reactividad posible. Se necesitaron tres tipos de materiales:

1. Un material que permita fabricar un recipiente para contener a la solución.
2. Un material que permita visualizar la solución, con las características del primero.
3. Un material que permita unir las partes, con las características del primero.

Para la mayor parte del recipiente se utilizó policloruro de vinilo o "PVC", entre sus características se puede mencionar que ¹:

- Es muy resistente a la corrosión.
- Tiene buena resistencia mecánica.
- Es de muy bajo costo.
- Es estable e inerte, con excelentes características en aplicaciones de higiene.
- Es un buen dieléctrico.

Se utilizó una unión de tipo T junto con tres tapones, todos de 110 milímetros de diámetro, utilizados comúnmente en conexiones domiciliarias para desagües o cloacas. En cuanto al material transparente, se utilizó polimetilmetacrilato o PMMA. Entre sus características podemos mencionar²:

- Muy resistente a la corrosión, a la intemperie y a los rayos UV.
- Alta resistencia al impacto, ligero.

¹"poly(vinyl chloride) (CHEBI:53243)". CHEBI.

²Charles A. Harper; Edward M. Petrie (10 de octubre de 2003). *Plastics Materials and Processes: A Concise Encyclopedia*. John Wiley and Sons. p. 9. ISBN 978-0-471-45920-0.

- Transparencia de alrededor del 93 %.
- Bajo costo.
- Baja reactividad.
- Es un buen dieléctrico.

Se utilizaron dos piezas rectangulares de tres milímetros de espesor, y una pieza cuadrada de 5 milímetros de espesor, para poder contar con tres ventanas de observación en el prototipo. Por último, para unir las partes y sellar de forma hermética el recipiente, se utilizó silicona. Entre sus características podemos mencionar ³:

- Buenas características adhesivas.
- Buenas características dieléctricas.
- Muy resistente, flexible e inerte ante la mayoría de los compuestos.
- Bajo costo.

Para todos los materiales se listaron las características mas importantes, las cuales responden a los criterios preliminares justificando su uso.

Materiales activos en contacto con la solución

En cuanto al ingreso y egreso de la solución en el recipiente, se utilizaron dos válvulas con algunas piezas de bronce tratado. El contacto de este material con la solución es prácticamente nulo y no influye en el proceso, ya que se encuentra alejado de la zona sometida a el campo eléctrico. En cuanto a los electrodos y sus respectivos cables y ajustes, se utilizó Aluminio (Al).

³Science of Silicone Polymers (Silicone Science On-line, Centre Européen des Silicones – CES)

Materiales externos

El cuidado sobre los materiales externos es menor que con aquellos que entran en contacto con la solución, por lo que las características deseables de los mismos se centran en la resistencia y la robustez. Excluyendo los componentes y accionadores electrónicos, algunos materiales externos incluyen:

- Estructura de madera.
- Gabinete de PVC.
- Espuma de poliéster.
- Herrajes de Acero y/o Aluminio.
- Pintura para plásticos.
- Cartón prensado y tapicería.

6.2 Diseño y modelo

Para el diseño se utilizó la aplicación SkethUp. El diseño final se puede apreciar en la figura 6.1, y el detalle de los componentes del mismo en la figura 6.2. Se incluyen los archivos del diseño en el DVD adjunto al presente informe.

6.2.1 Construcción

La construcción del modelo se llevo a cabo de forma manual. Se recortó una tabla a modo de base y dos listones de madera de pino, los cuales conformaron la estructura base. A los listones se le colocaron dos abrazaderas tipo "omega" diseñadas específicamente para cañería de 110 [mm], de modo que se pueda ajustar el recipiente principal a la estructura. A ambos tapones laterales, se les practicó un corte rectangular a modo de ventana de observación. En cada ventana se colocó una pieza de PMMA transparente de 3[mm], adherida con silicona. Para la abertura superior del recipiente se utilizó una pieza diseñada para una rejilla de

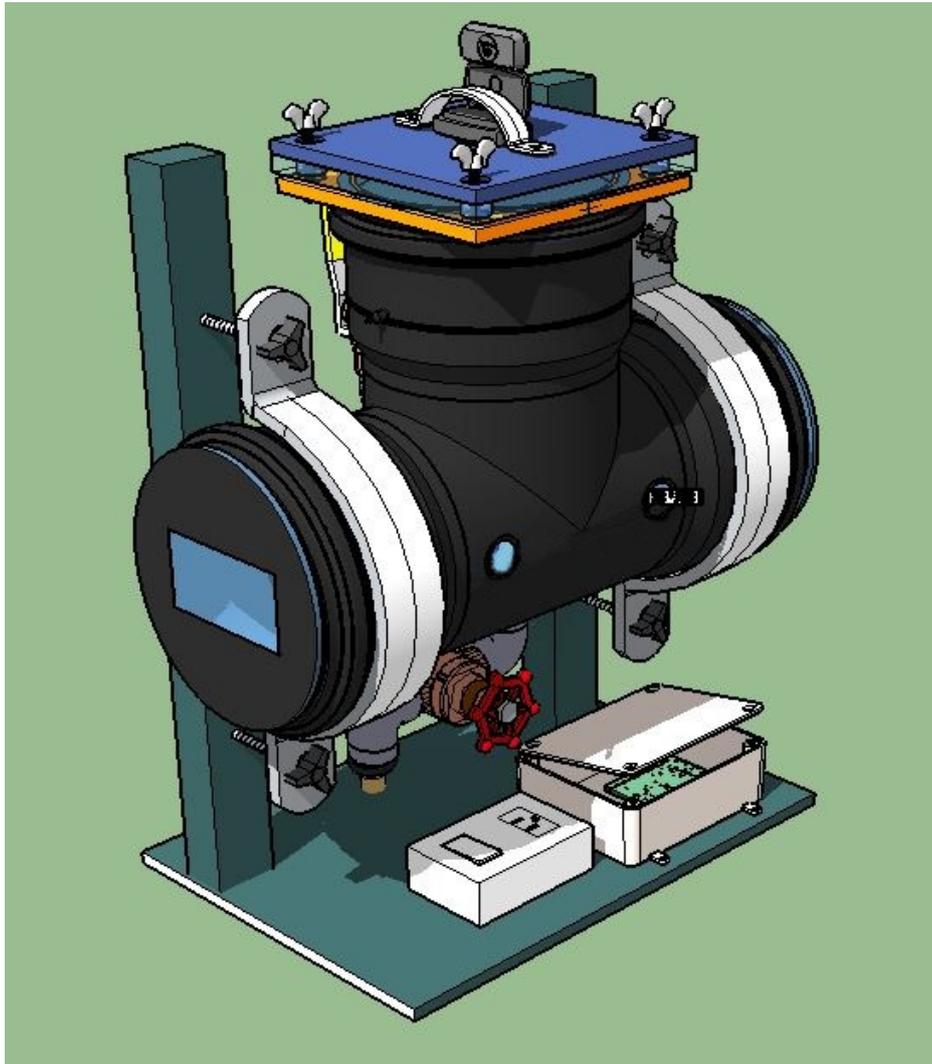


Fig. 6.1 Diseño del prototipo de cuba.

desagüe, para la cual se encargó la construcción de una pieza de PMMA transparente de 5[mm]. El ajuste de la pieza de PMMA y la rejilla se realiza mediante cuatro bulones y tuercas tipo "Mariposa". Las piezas destinadas a sellar las aberturas se colocaron junto con un aro de silicona, también llamado "O-Ring". Los dispositivos de plomería se colocaron con sellador a base de silicona. Como soporte para la webcam se construyó una pieza de cartón prensado tapizada, y se utilizó una abrazadera para asegurar la cámara. Por último se pintaron el soporte de madera de color verde oscuro y el recipiente de color negro, y se ajustaron las piezas eléctricas con los gabinetes correspondientes.

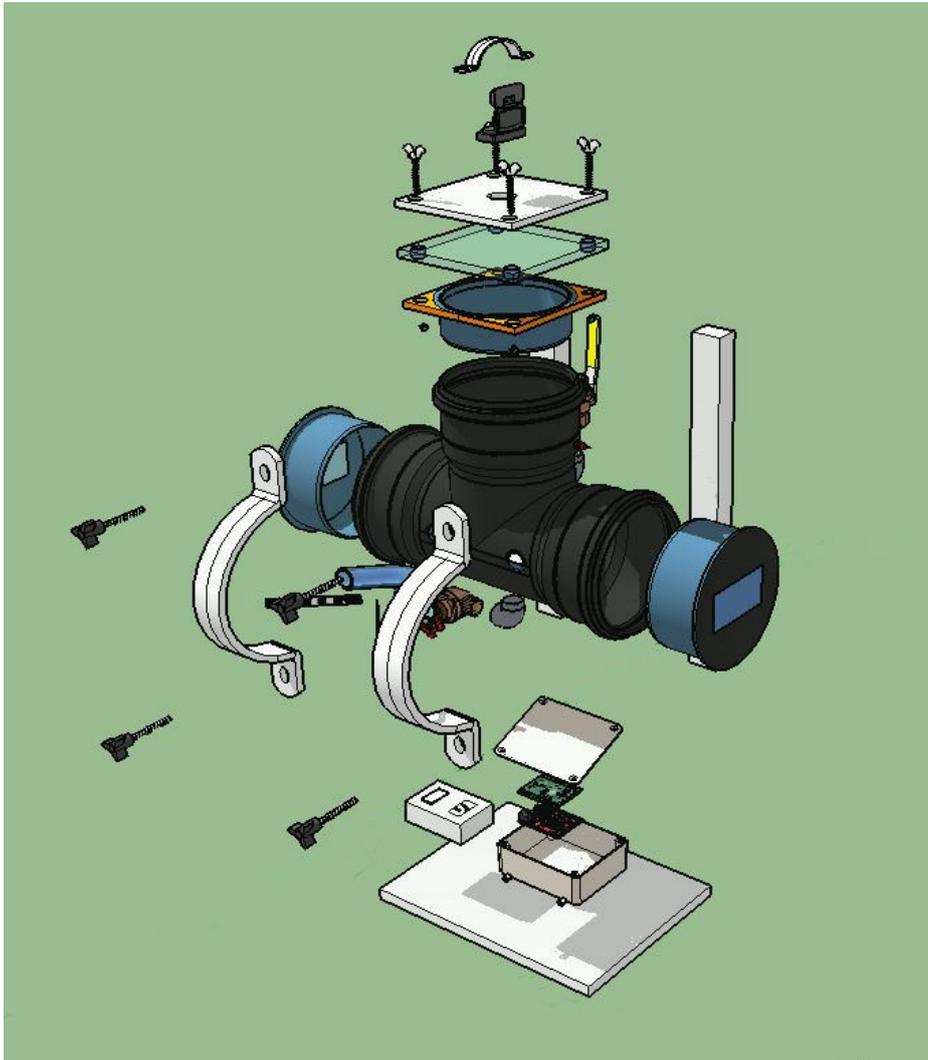


Fig. 6.2 Diseño del prototipo de cuba - Detalle.

6.3 Aspecto

El aspecto final del sistema se puede observar en las figuras 6.3 y 6.4.

6.4 Dimensiones específicas

Los planos del sistema se pueden encontrar en el anexo 2.



Fig. 6.3 Aspecto final del prototipo en perspectiva.



Fig. 6.4 Aspecto final del prototipo en vista frontal.

CAPÍTULO 7

Desarrollo del circuito electrónico

Este capítulo describe el *marco metodológico* referente al desarrollo del circuito electrónico. Las hojas de datos de todos los componentes utilizados se pueden encontrar en el DVD que acompaña el presente documento.

7.1 Consideraciones preliminares

Siguiendo los lineamientos planteados en el objetivo del proyecto integrador, se diseñó un sistema electrónico de bajo costo y fácil implementación, el cual trabaja en paralelo con el microcontrolador y provee la interfaz necesaria con el usuario y los periféricos. El mismo está compuesto por los siguientes módulos o partes:

- Acondicionadores de señal.
- Alimentación y regulación de tensión.
- Actuadores.
- Sensores.
- Indicadores.

- Controles.
- Periféricos.
- Conectores.

7.2 Acondicionadores de señal

Las señales de tensión a medir en el sistema electrónico son de características muy distintas, y se encuentran sometidas a ruidos e interferencia, por lo que el acondicionamiento de cada señal a medir tuvo su tratamiento específico. Las señales en cuestión son:

- Señal de tensión producto de la corriente circulante por los electrodos.
- Señal de tensión producto del sensor de temperatura.
- Señal de tensión presente en los electrodos.

Todas las señales necesitan ser adaptadas para ser medidas por el microcontrolador, por lo que en primera instancia se tuvo el criterio de diseño de aislar la misma, de modo que la impedancia vista hacia el microcontrolador sea lo mayor posible. Si bien las entradas analógicas del microcontrolador tienen una impedancia elevada, el microcontrolador es muy susceptible a ruidos, electricidad estática, interferencias, etc... que pueden afectar las mediciones y en casos extremos destruir periféricos de la placa de desarrollo.

7.2.1 Filtro pasa bajas

Para todas las señales se utilizó un filtro pasa bajas, y mediante el uso de un amplificador operacional es posible aislar electricamente el microcontrolador de las señales a medir.

Como primer medida, con el objetivo de eliminar los picos de ruido y componentes en alta frecuencia que pudieran estar presentes en la señal, se decidió diseñar un filtro con una frecuencia de corte inferior a los 250[Hz]. Se implementó un filtro de primer orden utilizando un amplificador operacional LM358N. Si bien el amplificador operacional aporta polos al

filtro, estos son del orden de los Mhz, muy superiores a la frecuencia de corte, y no se tendrán en cuenta para el análisis. El circuito implementado se puede observar en la figura 7.1.

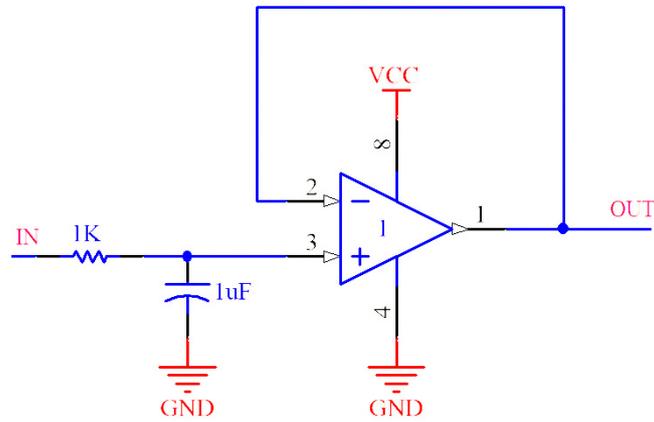


Fig. 7.1 Circuito de filtro pasa bajas.

La función de transferencia del filtro responde a la siguiente ecuación:

$$FT(S) = \frac{1000}{S + 1000}$$

Cuyo polo se encuentra en 0.001 [rps]. Por lo tanto, la frecuencia de corte en Hz será:

$$Fc(Hz) = \frac{1}{2\pi \times 10^{-3}} = 159.155Hz$$

La simulación de la respuesta en frecuencia del circuito se puede observar en la figura 7.2.

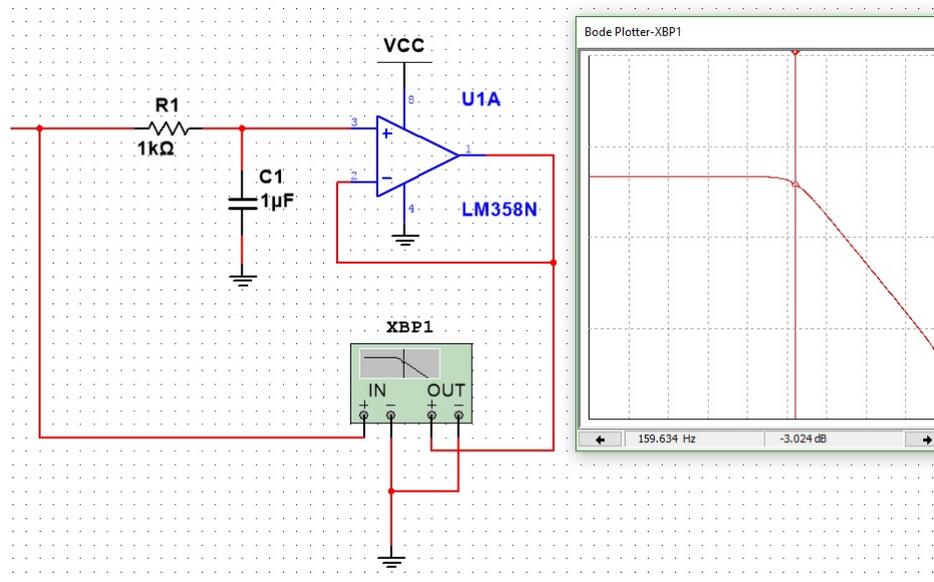


Fig. 7.2 Respuesta en frecuencia del filtro pasa bajas.

Para simular el sistema sometido a un entorno ruidoso, se debe considerar que las mediciones del ruido dependen fuertemente del lugar donde se encuentre instalado el sistema. Mediciones sobre el circuito realizadas en el pañol de instrumentos de la facultad donde se realizó el proyecto integrador (un sector particularmente ruidoso), determinaron valores de ruido con picos de hasta 5[mV]. (Se utilizó una fuente filtrada de 10 [V]) En la figura 7.3 se puede observar una de dichas mediciones.

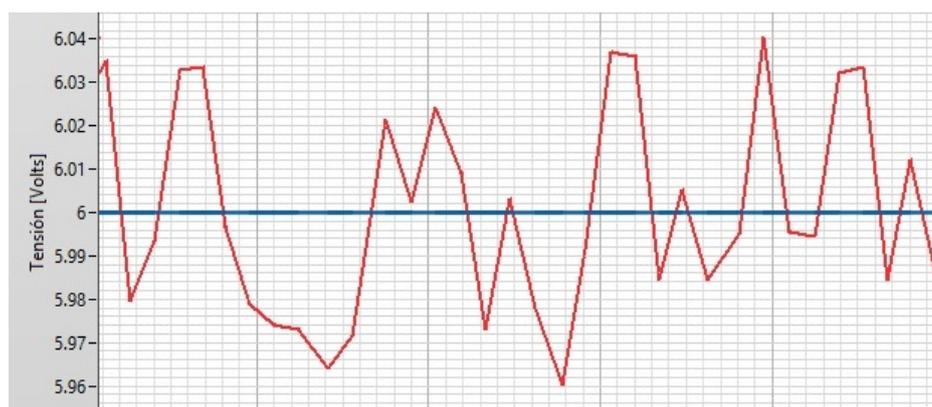


Fig. 7.3 Medición del ruido en el sistema.

Teniendo esto en consideración, se simula la respuesta del filtro ante una señal de 5 Voltios sometida a un ruido *gaussiano* de media cero y varianza de 50[mV]. Estos valores

son muy superiores a los valores que se espera en las mediciones, ya que se pretende simular la respuesta del filtro en un caso extremo. Se utilizó el esquema de la figura 7.4.

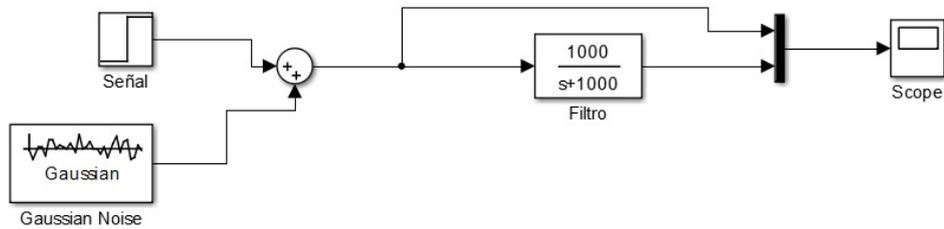


Fig. 7.4 Esquema para la simulación del filtro.

Los resultados obtenidos se pueden observar en la figura 7.5, en gris la señal que ingresa y en azul la señal filtrada. Se puede observar con claridad la reducción de ruido que provee el filtro. Es conveniente aclarar que la única señal sometida únicamente a este filtro es la señal de la temperatura, en la cual, como se verá en capítulos posteriores, la sensibilidad del sensor y la utilidad de la precisión en la medición no justifican tratamientos posteriores por software.

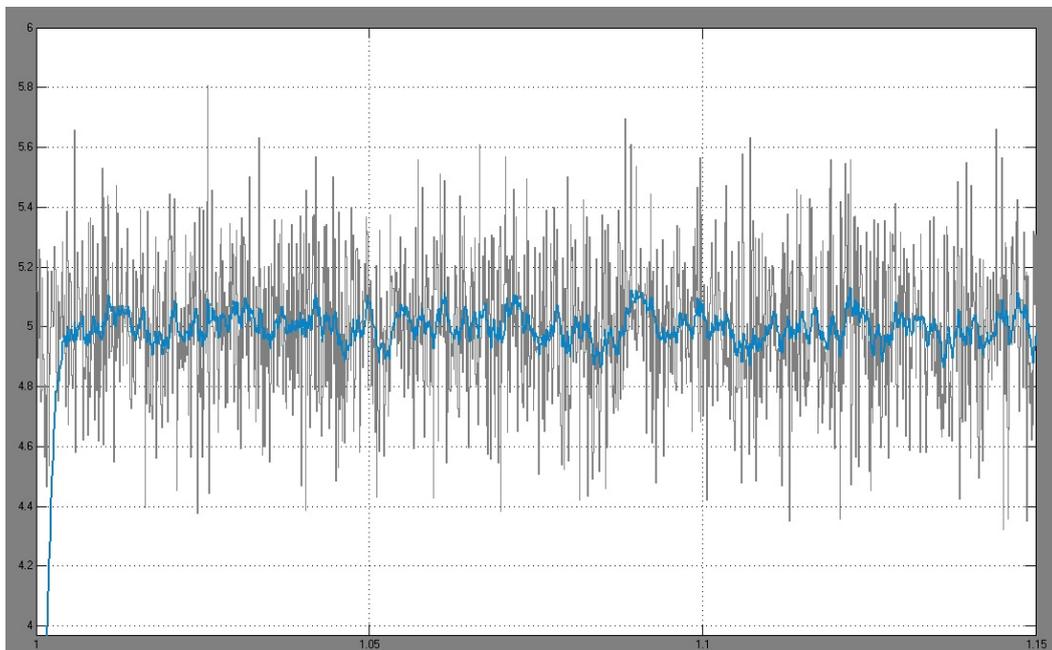


Fig. 7.5 simulación para una señal con ruido gaussiano.

7.2.2 Señal de tensión del sensor de corriente

Esta es la señal más crítica en el sistema, y se requiere la mayor precisión posible para su medición. La señal es producto de la corriente circulante a través del sensor de corriente (en este caso, una resistencia calibrada). Se decidió implementar un amplificador de instrumentación junto con el circuito de filtro de la sección 7.2.1. Además, la señal se encontrará sometida a un algoritmo de media, el cual constituye un filtro digital como se explica en la sección 5.1.6.

Amplificador de instrumentación

Se realizaron pruebas con los amplificadores AD620 y AD627 de Analog Devices, implementando finalmente el modelo AD627. El mismo es un amplificador de buenas características y bajo costo ¹. Las principales características se listan en la figura 7.6.

¹<http://www.analog.com/en/products/amplifiers/instrumentation-amplifiers/ad627>

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Parameter	Typ	Max
GAIN					DYNAMIC RESPONSE		
Gain Range	$G = +5 + (200 \text{ k}\Omega/R_G)$	5		1000	Small Signal -3 dB Bandwidth		
Gain Error ¹	$V_{out} = (-V_s) + 0.1 \text{ to } (+V_s) - 0.15$				G = +5	80	
G = +5			0.03	0.10	G = +100	3	
G = +10			0.15	0.35	G = +1000	0.4	
G = +100			0.15	0.35	Slew Rate	+0.05/-0.07	
G = +1000			0.50	0.70	Settling Time to 0.01%		
Nonlinearity					G = +5	65	
G = +5			10	100	G = +100	290	
G = +100			20	100	Settling Time to 0.01%		
Gain vs. Temperature ¹					G = +5	85	
G = +5			10	20	G = +100	330	
G > +5			-75		Overload Recovery	3	
VOLTAGE OFFSET					NOISE		
Input Offset, V_{os}^2	$V_{CM} = V_{REF} = +V_s/2$		50	250	Voltage Noise, 1 kHz		
Over Temperature				445	Input, Voltage Noise, e_{ni}	38	
Average TC			0.1	3	Output, Voltage Noise, e_{no}	177	
Output Offset, V_{oso}				1000	RTI, 0.1 Hz to 10 Hz		
Over Temperature				1650	G = +5	1.2	
Average TC			2.5	10	G = +1000	0.56	
Offset Referred to the Input vs. Supply (PSRR)					Current Noise	50	
G = +5		86	100		0.1 Hz to 10 Hz	1.0	
G = +10		100	120		REFERENCE INPUT		
G = +100		110	125		R_{IN}	125	
G = +1000		110	125		Gain to Output	1	
INPUT CURRENT					Voltage Range ¹		
Input Bias Current			3	10	POWER SUPPLY		
Over Temperature				15	Operating Range	± 1.1	± 18
Average TC			20			2.2	36
Input Offset Current			0.3	1	Quiescent Current	60	85
Over Temperature				2	Over Temperature	200	
Average TC			1		TEMPERATURE RANGE		
INPUT					For Specified Performance		
Input Impedance						-40	+85
Differential			20 2				
Common-Mode			20 2				
Input Voltage Range ³	$V_s = 2.2 \text{ V to } 36 \text{ V}$	$(-V_s) - 0.1$		$(+V_s) - 1$			
Common-Mode Rejection Ratio ³ DC to 60 Hz with 1 k Ω Source Imbalance	$V_{REF} = V_s/2$						
G = +5	$V_s = 3 \text{ V}, V_{CM} = 0 \text{ V to } 1.9 \text{ V}$	77	90				
G = +5	$V_s = 5 \text{ V}, V_{CM} = 0 \text{ V to } 3.7 \text{ V}$	77	90				
OUTPUT							
Output Swing	$R_L = 20 \text{ k}\Omega$	$(-V_s) + 25$		$(+V_s) - 70$			
	$R_L = 100 \text{ k}\Omega$	$(-V_s) + 7$		$(+V_s) - 25$			
Short-Circuit Current	Short circuit to ground		± 25				

Fig. 7.6 Características del Amplificador AD627.

Una de los aspectos que se tendrá en cuenta para la construcción del circuito, es la posibilidad de modificar la resistencia R_G , la cual determina la ganancia del amplificador. Se adquirió un amplificador con empaquetado DIP-8 como se indica en la figura 7.7.

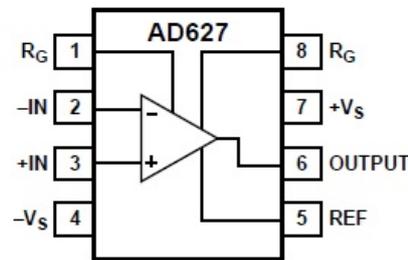


Fig. 7.7 Empaquetado del Amplificador AD627.

Se realiza una simulación simple del circuito, la cual se puede apreciar en la figura 7.8. Como se indica en las características del dispositivo, la ganancia es dependiente de R_g , y para R_g infinito (Sin resistencia colocada) la ganancia es de 5.

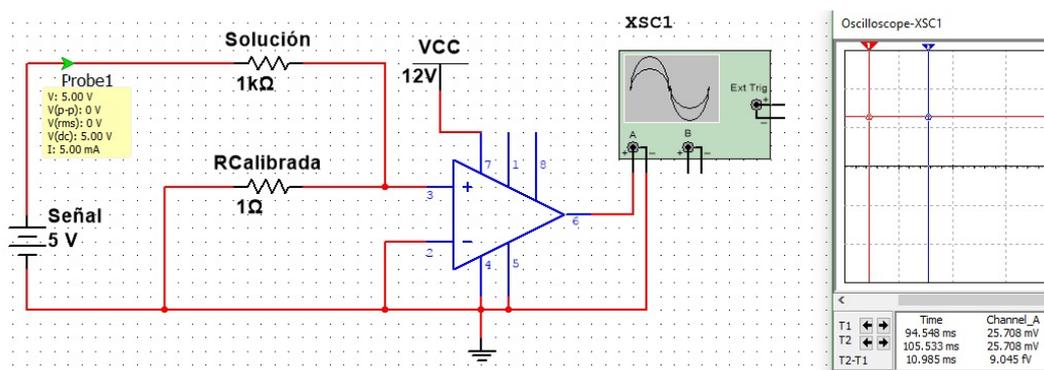


Fig. 7.8 Simulación del amplificador operacional.

En la simulación se obtiene un valor de 25.7 [mV] a la salida del amplificador, lo que indicaría una corriente dependiente de la quinta parte de este valor dividido el valor de la resistencia calibrada. En este caso:

$$\text{Corriente medida (mA)} = \frac{25.7 \text{ mV}}{5 \times 1 \Omega} \pm \Delta I$$

Podemos ver que en este ejemplo el valor de corriente medido es 5.14 [mA], con un rango de error determinado. El simulador intenta tomar en consideración todos los errores

del modelo del dispositivo, y es por eso que el valor medido difiere del valor de corriente "real" (Simulado). Existen distintas fuentes de error en el amplificador, y las mas importantes se encuentran bien definidas por el fabricante.

Errores de Offset

Los errores de offset se encuentran referidos a la entrada, en la tabla siguiente se listan los errores máximos, para referir los errores a la salida basta con aplicar la siguiente ecuación:

²

$$Total\ Error\ RTO = (Input\ Error \times G) + Output\ Error$$

Ganancia	Error máximo (uV)
5	450
10	350
20	300
50	270
100	270
500	252
1000	251

Errores de Ganancia

La ganancia del amplificador varia con la temperatura, y además tiene un error dependiente del valor de ganancia configurado. Este error no considera la tolerancia que pueda llegar a tener Rg. Los datos del fabricante listan:

²RTO: (*inglés*) Referido a la salida

Ganancia	Error típico	Error máximo
5	0.03 %	0.10 %
10	0.15 %	0.35 %
100	0.15 %	0.35 %
1000	0.50 %	0.70 %

Error total

Para el circuito implementado, se tendrá un error de ganancia típico de 0.03% y un error máximo de 0.1%. En cuanto al error de offset, el máximo es de 450 micro voltios. El intervalo de error típico a la salida para el circuito implementado es:

$$(-450\mu V - 0.03xVin, 450\mu V + 0.03xVin)$$

Mientras que el intervalo de error máximo es:

$$(-450\mu V - 0.1xVin, 450\mu V + 0.1xVin)$$

Para el caso del ejemplo, considerando que la resistencia calibrada no tiene un error considerable (En la simulación no tiene tolerancia) tendríamos que:

$$\text{Corriente medida (mA)} = 5.14\text{mA} \pm 0.45\text{mA}$$

Encontrando que el valor real de 5[mA] se encuentra contenido en el intervalo.

Circuito completo

Como ya se mencionó, a la salida del amplificador de instrumentación habrá un filtro pasabajas como el desarrollado en la sección anterior. Además cabe mencionar que se cuenta con un filtro de media por software, y el ya mencionado sistema de calibración para reducir el

error de offset implementado en la instrumentación virtual. En la figura 7.9 se puede observar el mismo ³.

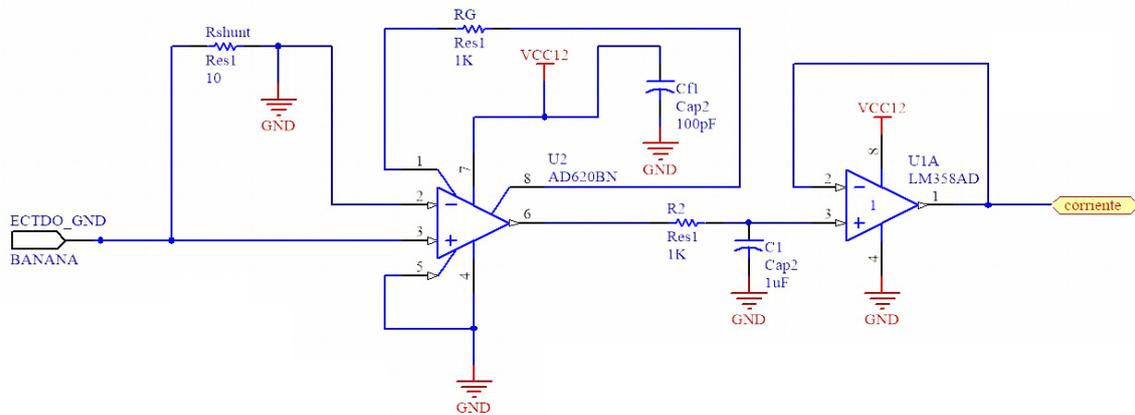


Fig. 7.9 Circuito completo para la medición de corriente.

7.2.3 Señal de d.d.p. entre electrodos

En el caso de la señal de d.d.p. entre electrodos, a diferencia de las otras señales tratadas las cuales deben ser amplificadas, en este caso es necesario efectuar una atenuación. Cabe mencionar que esta señal constituye la referencia para el sistema de control de tensión a lazo cerrado para la anodización. Los valores que puede adquirir esta señal están directamente relacionados con la tensión de alimentación, el sistema que determina la tensión en el ánodo positivo se presentará en capítulos posteriores, y constituye un amplificador de señal mediante un dispositivo MOSFET. A los efectos de obtener los límites de esta señal, se debe considerar que el límite superior de la misma corresponde a la tensión de fuente menos la caída de tensión que ocurre a lo largo del canal *drain - source* del MOSFET. Dicho esto, de efectuarse un cortocircuito en este canal, la tensión medida será directamente la tensión de fuente. Con esta consideración, la señal deberá ser atenuada de tal modo que la tensión de fuente multiplicada por la ganancia del atenuador no supere el valor máximo admisible por el microcontrolador. En el circuito implementado, la tensión de referencia del conversor ADC constituye la tensión máxima admisible, la cual tiene un valor de 3.3 Volts. De modo que:

³R_g se observa en la figura con un valor de 1KOhm, este valor es de referencia ya que la resistencia puede variar o no estar, según la ganancia deseada

$$G_{max} = \frac{3.3V}{V_{cc}}$$

Se utiliza un amplificador operacional LM358N para construir el circuito. Debido a que la tensión de fuente puede tomar distintos valores dentro de un rango admitido, el diseño del atenuador estará ligado al valor de tensión elegido, para modificar su valor bastará con modificar el valor de una o dos resistencias en el circuito, las cuales constituyen un divisor de tensión según se ilustra en la figura 7.10 que describe el circuito de adaptación de señal completo utilizado.

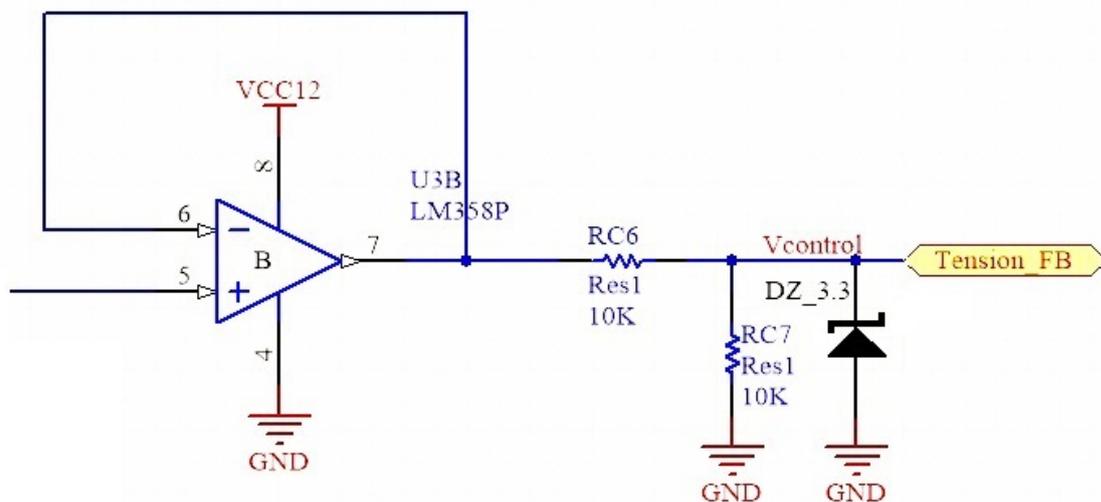


Fig. 7.10 Circuito de adaptación para medir la ddp entre electrodos.

En el circuito, RC6 y RC7 representan el divisor resistivo que determina la ganancia de atenuación. Los valores deben ser elegidos de modo que:

$$G_{max} \geq \frac{RC7}{RC6 + RC7}$$

Otra característica notable en el circuito es el diodo a la salida, el mismo se colocó como una opción constructiva. Se trata de un diodo Zener cuyo propósito es limitar la tensión

que puede presentarse a la entrada del ADC del microcontrolador. El mismo no se encuentra en el circuito final, ya que su uso esta basado en la posibilidad que existe de modificar la tensión de referencia del microcontrolador, algo que se implementó en las pruebas pero no en el prototipo final. En la placa de desarrollo, la tensión de referencia analógica se encuentra conectada a una referencia regulada interna de 3.3 volt, y se indica que componentes deben retirarse para utilizar un conector destinado a brindar una referencia externa al conversor analógico digital. La sección del circuito en la placa de desarrollo se muestra en la figura 7.11.

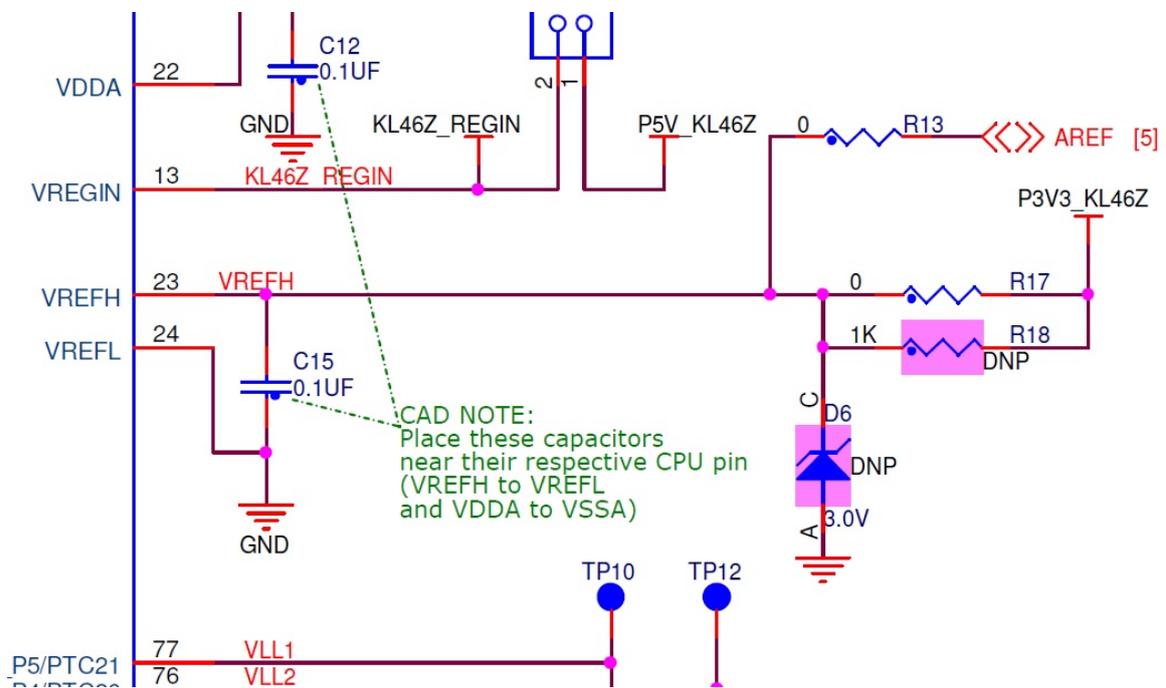


Fig. 7.11 Detalle de la tensión de referencia en la placa de desarrollo.

Para utilizar una referencia externa es necesario retirar la resistencia R17. Existe la opción de colocar el diodo zener de la figura 7.10 en el espacio designado para D6 denotado con "DNP" en la placa de desarrollo pero requiere herramientas especiales y contar con el componente de montaje superficial requerido.

7.2.4 Señal de tensión para la medición de temperatura

La señal de tensión en este caso proviene de un sensor lineal LM35DZ, cuyas características se describen en una sección posterior. Los límites de esta señal están dados por los límites del componente y su sensibilidad. Sabiendo que la sensibilidad es de 10[mV] por grado celsius, partiendo de 0 grados. Resulta evidente que las temperaturas a las cuales el sistema va a estar sometido no van a generar señales que superen los límites máximos admitidos por el microcontrolador, por lo que la adaptación de señal para este sensor consta únicamente de el filtro desarrollado en la sección 7.2.1, sin ningún otro tratamiento posterior o consideración especial. El circuito implementado se puede apreciar en la figura 7.12.

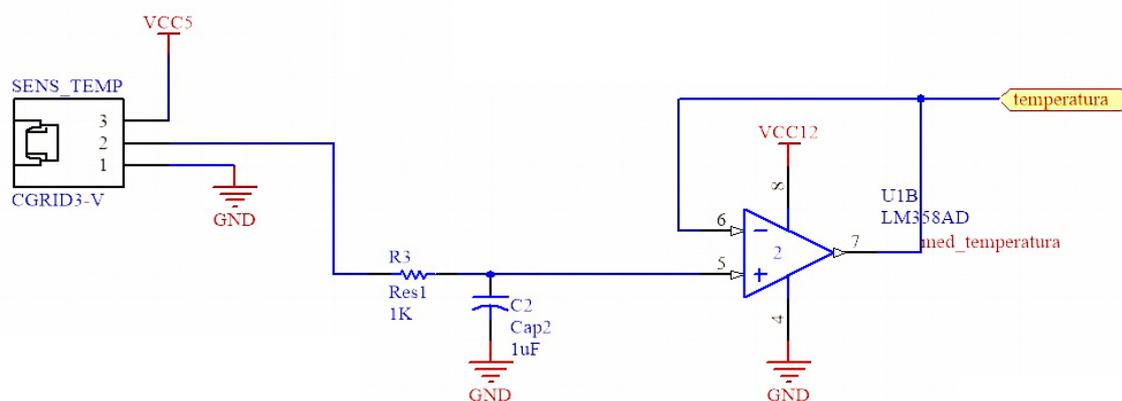


Fig. 7.12 Circuito de adaptación para la señal de temperatura.

7.2.5 Señal de tensión del DAC

Como nota extra, cabe mencionar que se reserva una entrada analógica en el microcontrolador para monitorear la salida del DAC. Esta señal no tiene acondicionamiento alguno, es simplemente un cortocircuito entre la salida del DAC y una entrada analógica. Debido a que los límites del DAC son iguales a los del ADC, el cual tiene una impedancia de entrada muy elevada, no es necesario adaptar la señal. Tampoco es necesario tener precisión en esta medición, constituye simplemente una opción de depuración.

7.3 Alimentación y regulación de tensión

El circuito externo al microcontrolador cuenta con un sistema de regulación de tensión propio, basado en un regulador de tensión serie 7805. Los componentes a utilizar (incluidos los periféricos) pueden funcionar a 5 voltios, si bien algunos requieren mas tensión, estos pueden ser alimentados directamente desde la fuente externa sin regulación en el circuito mismo. La tensión de anodización depende a su vez de la tensión de alimentación, por lo que la fuente externa debe elegirse teniendo en cuenta esta limitación. El circuito implementado se puede observar en la figura 7.13.

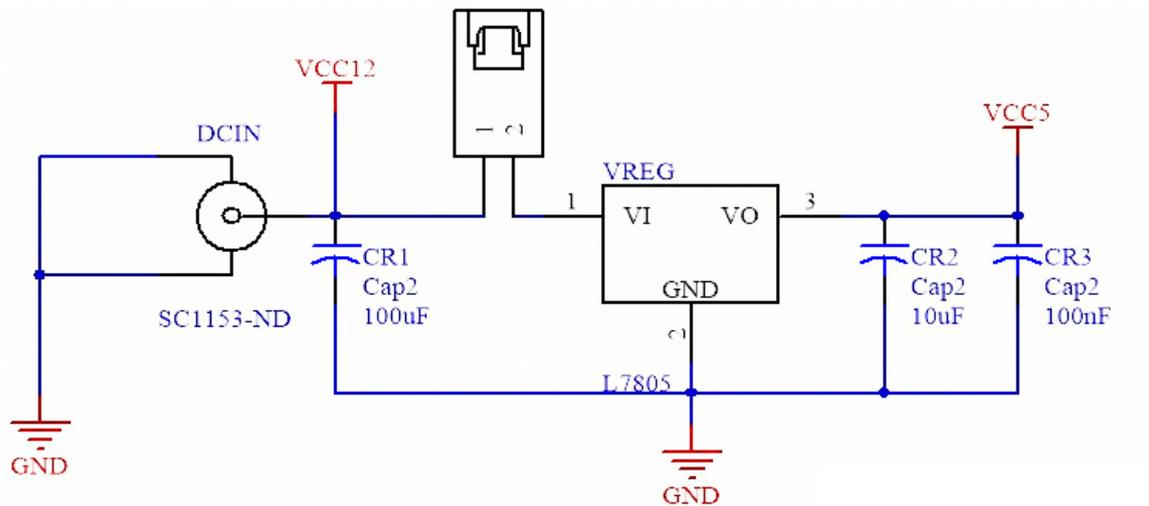


Fig. 7.13 *Circuito de regulación de tensión.*

El mismo es un circuito de uso común, como características constructivas se incluye un conector "DC" y un conector MOLEX para colocar un switch.

7.4 Actuadores

Existen dos actuadores en el circuito. Un servomotor, y un sistema de amplificación para la señal de tensión de los electrodos, cuyo control es a través del DAC del microcontrolador.

7.4.1 Servomotor

El servomotor utilizado es un modelo SG90 de TowerPro. La apariencia del mismo se puede apreciar en la figura 7.14. Las características que el fabricante brinda son:

- Peso: 9 g
- Dimension: 22.2 x 11.8 x 31 mm approx.
- Torque: 1.8 kgf·cm
- Velocidad operativa: 0.1 s/60 degree
- Tensión operativa: 4.8 V (5V)
- Ancho de banda muerto: 10 μ s
- Rango de temperatura: 0 °C – 55 °C

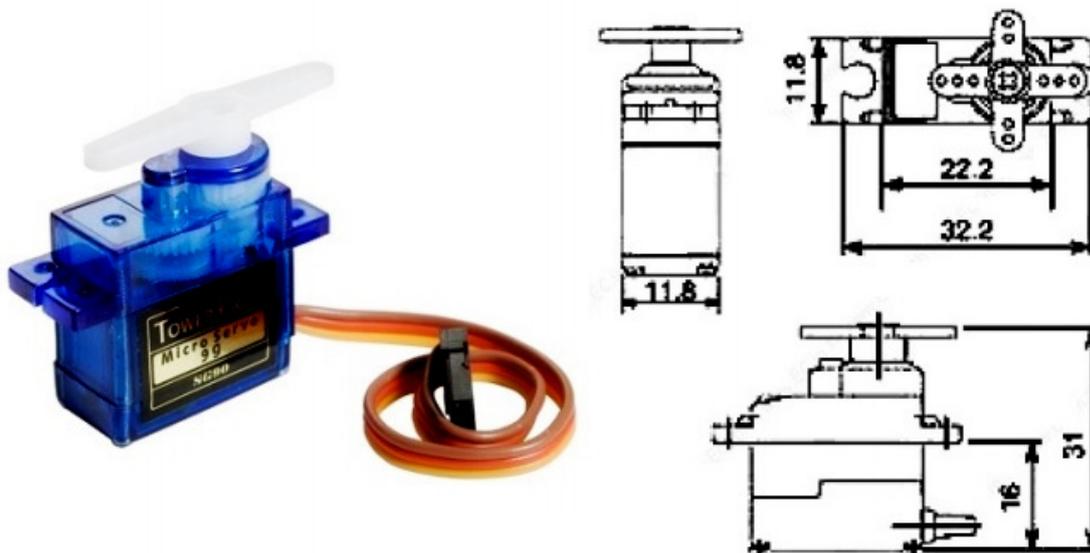


Fig. 7.14 Servomotor SG90.

El servomotor es controlado con el módulo PWM del microcontrolador, y será utilizado en el movimiento de las celdas solares como se describirá en secciones posteriores. La

conexión del mismo se muestra en la figura 7.15. Como se mencionará en las mejoras a futuro, se anticipa la existencia de otro servo, por lo que se reserva una segunda salida PWM del microcontrolador.

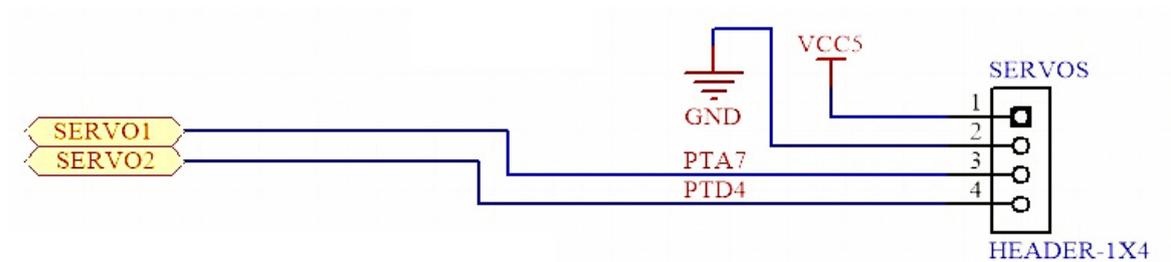


Fig. 7.15 Conexión del servomotor SG90.

7.4.2 Control de tensión de anodización

El sistema de actuación para la tensión de anodizado, comienza con el módulo DAC del microcontrolador; el mismo se encuentra acoplado a un sistema que está constituido por un modulo de pre-amplificación (diseñado con un amplificador operacional) y un transistor MOSFET de canal tipo N. El objetivo es controlar el ancho del canal del MOSFET mediante el DAC. Se utiliza un transistor MOSFET debido a las características lineales de la respuesta del mismo, aunque en esta sección se presenta un sistema a lazo abierto, debe considerarse que en la implementación final este módulo funcionará junto con el módulo descrito en la sección 7.2.3 a lazo cerrado, lo que mejorará la precisión de la tensión de anodización notablemente. El circuito implementado se presenta en la figura 7.16.

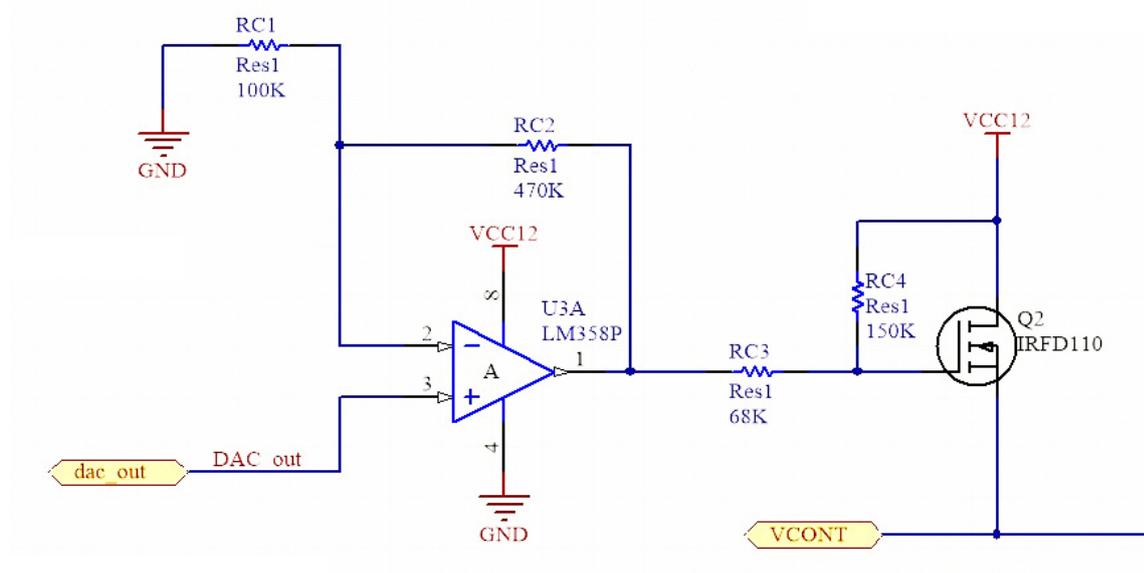


Fig. 7.16 Circuito de actuación para la tensión de anodización.

Como se puede observar, la ganancia de la etapa de pre amplificación está dada por la relación entre las resistencias RC1 y RC2, de modo que:

$$\text{Ganancia} = 1 + \frac{RC2}{RC1}$$

En el caso implementado, la ganancia es de 5.7. A su vez, el circuito de excitación del MOSFET lo constituyen las resistencias RC3 y RC4. Los valores de todas las resistencias involucradas en este módulo son elevados, de modo que las tensiones involucradas sean las que determinen el comportamiento final del conjunto, independizando las corrientes y facilitando los cálculos. Sabemos que la corriente que ingresa a la "gate" del MOSFET es despreciable, y que el ancho del canal dependerá de la tensión entre los terminales "gate" y "source". Recordando la ecuación que modela el MOSFET:

$$I_{ds} = \frac{1}{2} \cdot K' \cdot n \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{gs} - V_t)^2$$

Simplificaremos:

$$K = \frac{1}{2} \cdot K'n \cdot \frac{W}{L} \implies Ids = K \cdot (Vgs - Vt)^2$$

Nos interesa encontrar la tensión a bornes de una resistencia en el terminal "source" del dispositivo. Sabemos que la caída de tensión en dicha resistencia (que representa la resistencia del medio donde se encuentran sumergidos los electrodos), es el valor de dicha resistencia multiplicado por la corriente "drain-source". Debemos entonces hallar la tensión de "gate" en el circuito en función de la tensión de salida del operacional y eventualmente de la tensión de control (Tensión del DAC), analizando:

$$Vg = Vo + \frac{(Vcc - Vo) \cdot RC3}{RC4 + RC3}$$

Donde V_o corresponde es la tensión de salida del operacional, tal que:

$$V_o = G \cdot Vdac$$

Donde G es la ganancia del amplificador no inversor (Con la configuración implementada toma un valor de 5.7) y $Vdac$ es la tensión del conversor digital a analógico del microcontrolador. Es de interés que exista una tensión continua cuando la tensión de control del DAC fuera 0, lo que se logra con $RC4$, de este modo se logra la saturación más rápido y es posible ampliar el rango dinámico para el control. Reemplazando con los valores implementados:

$$Vg = (5.7) \cdot Vdac + (Vcc - (5.7) \cdot Vdac) \cdot (0.312)$$

Operando:

$$Vg = (3.92) \cdot Vdac + (0.312) \cdot Vcc$$

Asumiendo que el transistor se encuentra en la zona de saturación (Por diseño se pretende que así sea) tendremos que:

$$V(anod) = K \cdot R(medio) \cdot (Vg - V(anod) - Vt)^2$$

Lo que se traduce en la ecuación cuadrática:

$$V(anod)^2 - 2 \cdot (Vg - Vt) \cdot V(anod) - \frac{2}{R \cdot K} \cdot V(anod) + (Vg - Vt)^2 = 0$$

Cuya solución positiva es:

$$V(anod) = Vg - Vt + \frac{1}{RK} - \sqrt{\frac{1}{R^2 K^2} + \frac{2}{RK} \cdot (Vg - Vt)}$$

Finalmente, reemplazando se tiene que:

$$V(anod) =$$

$$(3.92) \cdot V_{dac} + (0.312) \cdot V_{cc} - V_t + \frac{1}{RK} - \sqrt{\frac{1}{R^2 K^2} + \frac{2}{RK}} \cdot ((3.92) \cdot V_{dac} + (0.312) \cdot V_{cc} - V_t)$$

Se obtuvo una ecuación que modela la tensión de anodización en función de la tensión de DAC. Suponiendo V_{cc} , V_t y K constantes, se puede apreciar que la tensión de anodización depende de la impedancia del medio la cual no solo es desconocida, si no que es variable con el proceso, razón por la cual es necesario un lazo de control para determinar con exactitud la tensión de anodización necesaria. Para simplificar el análisis, reemplazamos con los valores de los componentes implementados. El MOSFET elegido es el IRF110, algunas de sus características principales se muestran en la figura 7.17. Aproximando con un valor de $K=0.027$ ($V_T=4V$) y considerando una fuente de 12 Volts, reemplazando en la ecuación obtenemos que:

$$V(anod) = (V_{dac}) \cdot 5.7 - 4 + \frac{1}{R \cdot 0.027} - \sqrt{\frac{1}{R^2 \cdot 7.29 \cdot 10^{-4}} + \frac{2}{0.027 R}} \cdot (V_{dac} \cdot 5.7 - 4)$$

Resolviendo para una impedancia de 1000 Ohmios obtenemos:

$$V(anod) = 3.92 \cdot (V_{dac}) + 3.744 - 4 + \frac{1}{27} - \sqrt{\frac{1}{729} + \frac{2}{27}} \cdot (3.92 \cdot (V_{dac}) + 3.744 - 4)$$

Operando y aproximando a 3 cifras decimales:

$$V(\text{anod}) = 3.92 \cdot (V_{\text{dac}}) - 0.219V - \sqrt{0.29 \cdot (V_{\text{dac}}) - 0.0175V}$$

SPECIFICATIONS ($T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise noted)						
PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Static						
Drain-Source Breakdown Voltage	V_{DS}	$V_{\text{GS}} = 0\text{ V}$, $I_{\text{D}} = 250\text{ }\mu\text{A}$	100	-	-	V
V_{DS} Temperature Coefficient	$\Delta V_{\text{DS}}/T_J$	Reference to $25\text{ }^\circ\text{C}$, $I_{\text{D}} = 1\text{ mA}$	-	0.12	-	V/ $^\circ\text{C}$
Gate-Source Threshold Voltage	$V_{\text{GS(th)}}$	$V_{\text{DS}} = V_{\text{GS}}$, $I_{\text{D}} = 250\text{ }\mu\text{A}$	2.0	-	4.0	V
Gate-Source Leakage	I_{GSS}	$V_{\text{GS}} = \pm 20\text{ V}$	-	-	± 100	nA
Zero Gate Voltage Drain Current	I_{DSS}	$V_{\text{DS}} = 100\text{ V}$, $V_{\text{GS}} = 0\text{ V}$	-	-	25	μA
		$V_{\text{DS}} = 80\text{ V}$, $V_{\text{GS}} = 0\text{ V}$, $T_J = 150\text{ }^\circ\text{C}$	-	-	250	
Drain-Source On-State Resistance	$R_{\text{DS(on)}}$	$V_{\text{GS}} = 10\text{ V}$ $I_{\text{D}} = 0.60\text{ A}^{\text{b}}$	-	-	0.54	Ω
Forward Transconductance	g_{fs}	$V_{\text{DS}} = 50\text{ V}$, $I_{\text{D}} = 0.60\text{ A}^{\text{b}}$	0.80	-	-	S
Dynamic						
Input Capacitance	C_{iss}	$V_{\text{GS}} = 0\text{ V}$, $V_{\text{DS}} = 25\text{ V}$, $f = 1.0\text{ MHz}$, see fig. 5	-	180	-	pF
Output Capacitance	C_{oss}		-	81	-	
Reverse Transfer Capacitance	C_{rss}		-	15	-	
Total Gate Charge	Q_{g}	$V_{\text{GS}} = 10\text{ V}$ $I_{\text{D}} = 5.6\text{ A}$, $V_{\text{DS}} = 80\text{ V}$, see fig. 6 and 13 ^b	-	-	8.3	nC
Gate-Source Charge	Q_{gs}		-	-	2.3	
Gate-Drain Charge	Q_{gd}		-	-	3.8	
Turn-On Delay Time	$t_{\text{d(on)}}$	$V_{\text{DD}} = 50\text{ V}$, $I_{\text{D}} = 5.6\text{ A}$, $R_{\text{g}} = 24\text{ }\Omega$, $R_{\text{D}} = 8.4\text{ }\Omega$, see fig. 10 ^b	-	6.9	-	ns
Rise Time	t_{r}		-	16	-	
Turn-Off Delay Time	$t_{\text{d(off)}}$		-	15	-	
Fall Time	t_{f}		-	9.4	-	
Internal Drain Inductance	L_{D}	Between lead, 6 mm (0.25") from package and center of die contact 	-	4.0	-	nH
Internal Source Inductance	L_{S}		-	6.0	-	

Fig. 7.17 Características del transistor IRF110.

Se simula el circuito de la figura 7.18. En la figura 7.19 se puede observar la tensión a bornes de la resistencia que representa el medio, y la tensión del DAC en función del tiempo. Para facilitar la comparación entre las tensiones simuladas y analíticas, se realiza un gráfico de puntos superpuesto el cual se puede observar en la figura 7.20.

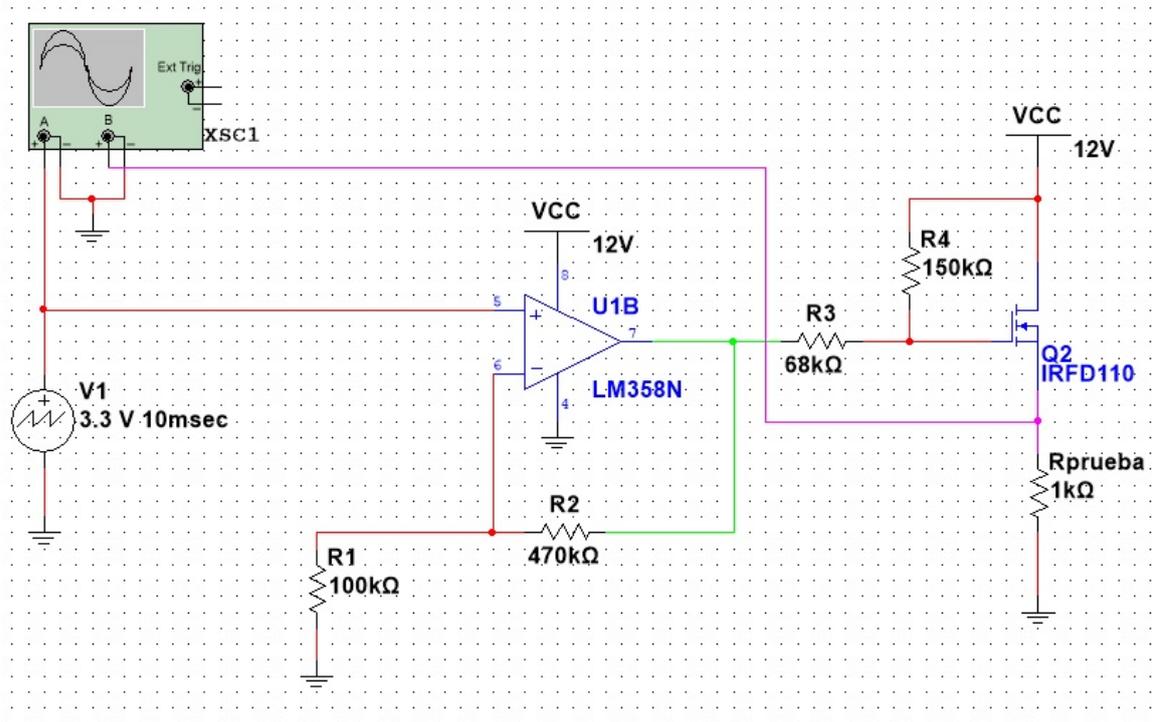


Fig. 7.18 Simulación para el transistor IRF110.

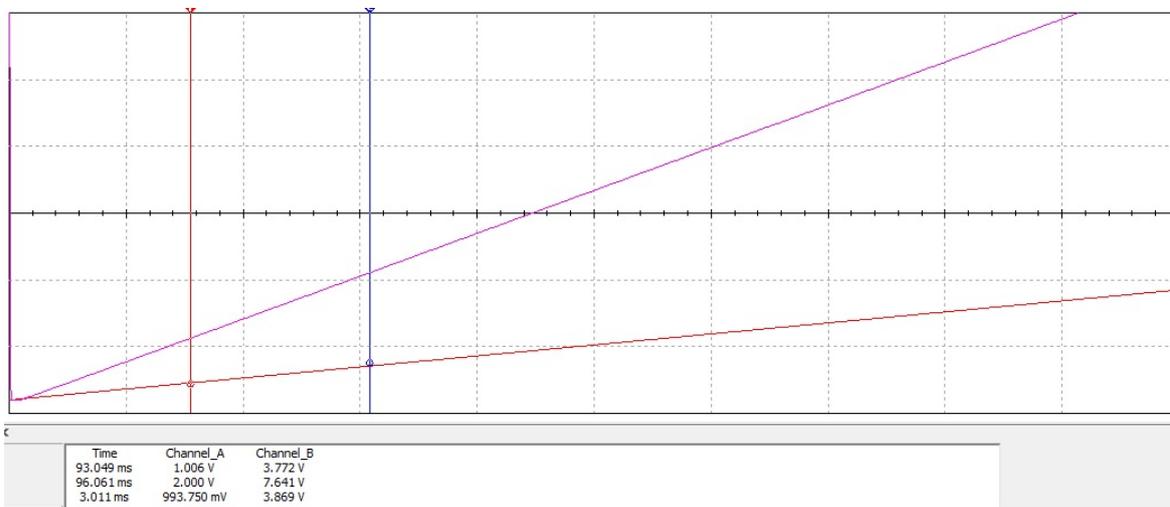


Fig. 7.19 Simulación de la tensión de control y la tensión de anodización en el tiempo.

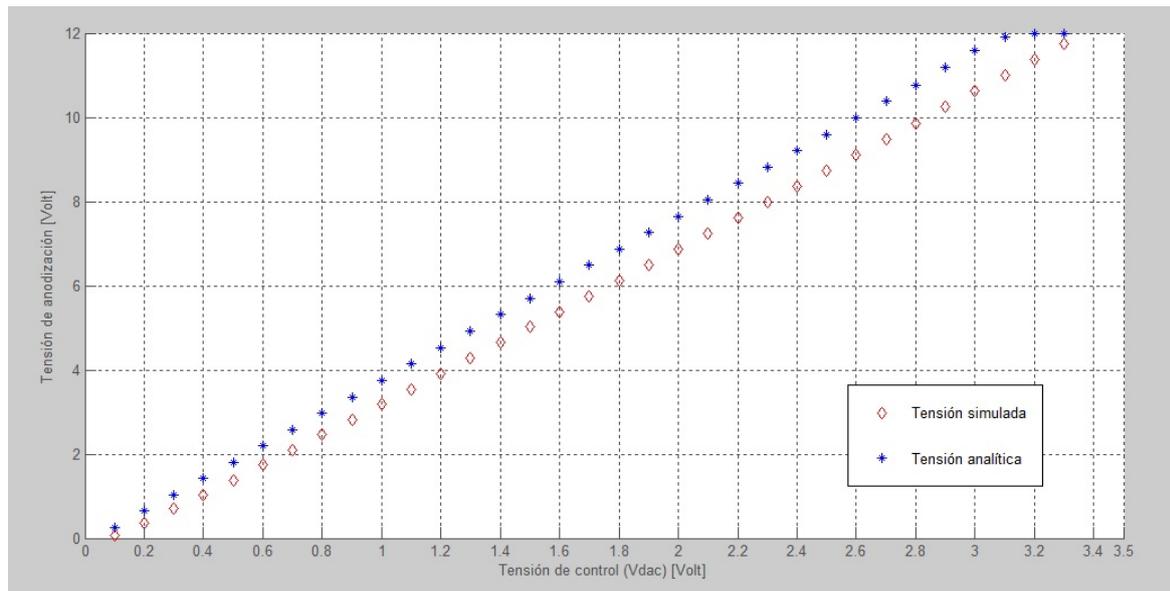


Fig. 7.20 Comparativa de tensiones analíticas y simuladas.

La simulación arroja datos satisfactorios, es posible realizar un control de tensión de características lineales a través del sistema diseñado. Las diferencias entre los cálculos analíticos y la simulación se deben a la tolerancia de los componentes, sobretodo a los valores del transistor. La ecuación analítica es particularmente sensible al valor del parámetro "K", el cual es muy disperso dentro de esta familia de transistores. Cabe destacar que de ser necesaria más corriente, es posible reemplazar el transistor por uno de más capacidad, debiendo solamente modificar el valor de las resistencias de la etapa preamplificadora en el operacional para adaptar la señal de control. El circuito implementado se puede observar en la figura 7.21

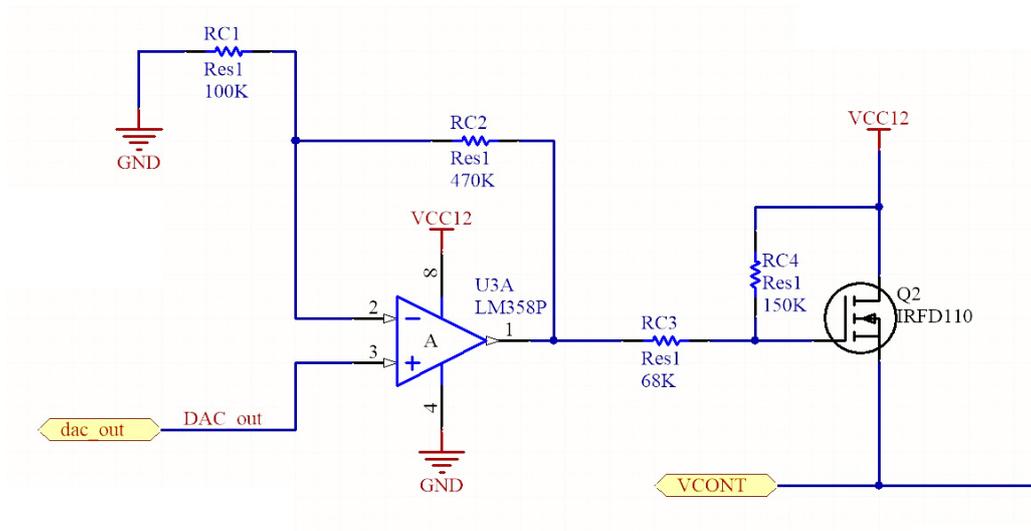


Fig. 7.21 Circuito implementado para la tensión de anodización.

7.4.3 Variable digital auxiliar

Se reserva una salida digital en el microcontrolador, y se diseña una red de amplificación para un uso no definido. Esta señal se puede conmutar entre un LED indicador, o utilizarse para un actuador o indicador externo, como por ejemplo un LED en un tablero o un relé. El circuito implementado se presenta en la figura 7.22

7.5 Sensores

Se utilizarán dos sensores en el sistema, uno de ellos para medir la corriente de anodización, y otro para medir la temperatura. Si bien dentro del servo existe un sensor de posición, el control de la posición del mismo, desde el punto de vista del microcontrolador, se realiza a lazo abierto. Puede entenderse como un módulo sensor el sistema de medición para la tensión de anodización, ya que la función del mismo es sensar dicha tensión y realimentar la medición para realizar una acción de control. En cualquier caso, el mismo ya fue desarrollado en la sección 7.2.3.

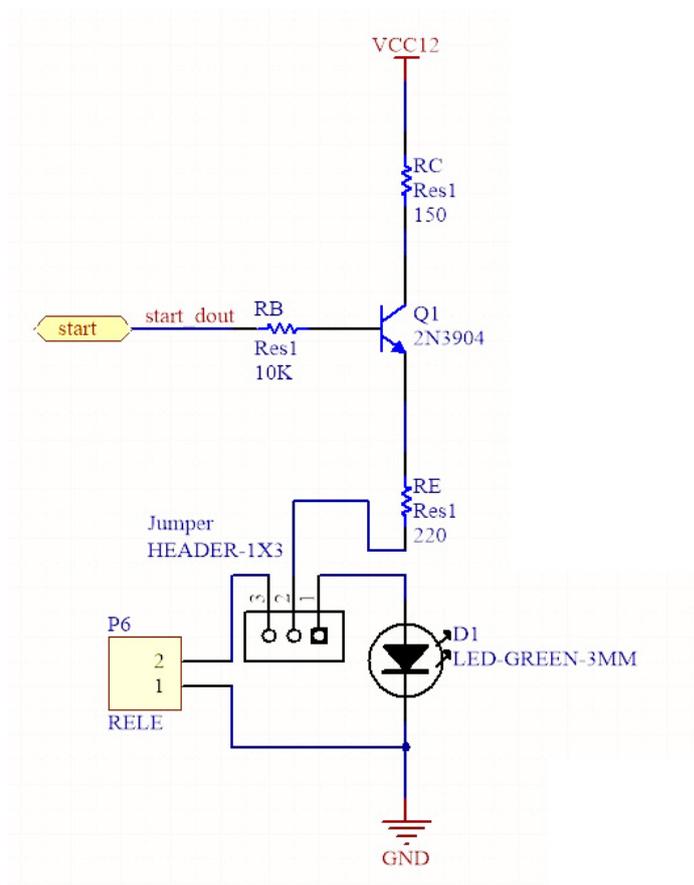


Fig. 7.22 Salida digital auxiliar.

7.5.1 Sensor de corriente

Se hicieron pruebas con tres sensores de corriente, dos de ellos basados en efecto Hall, y uno basado en medición de la caída de tensión en una resistencia calibrada.

Para corrientes elevadas

Para sensar corrientes elevadas (Superiores al amperio), se hicieron pruebas con dos dispositivos basados en los circuitos integrados ACS712-05 y ACS712-20. El integrado ACS712-05 soporta corrientes de hasta 5 amperios, mientras que el otro modelo mencionado soporta corrientes de hasta 20 amperios. La sensibilidad de estos dispositivos es:

Table 7.1 Sensibilidad de los dispositivos AC712

Modelo	Sensibilidad (mV/A)
ACS712ELCTR-05B-T	185
ACS712ELCTR-20A-T	100

El error en la sensibilidad es de 5[mV/A] para el primer dispositivo. Suponiendo que se utiliza este sensor, significaría tener un error en la medición de corriente de 27[mA], un valor demasiado elevado para las corrientes que se pretende medir en los procesos tratados. Además, el circuito integrado requiere una alimentación extremadamente estable y regulada, ya que cualquier variación de la referencia de 5 voltios interna resultará en un Offset en la medición de corriente. Todos los integrados se pueden adquirir en un módulo indistinguible entre modelos, el mismo se puede apreciar en la figura 7.23. Las pruebas con este modulo arrojaron resultados de muy poca precisión, y en principio se descarta la utilización de este módulo en el prototipo final, pero de ser necesaria su implementación es posible utilizarlo sin mayores modificaciones al circuito.

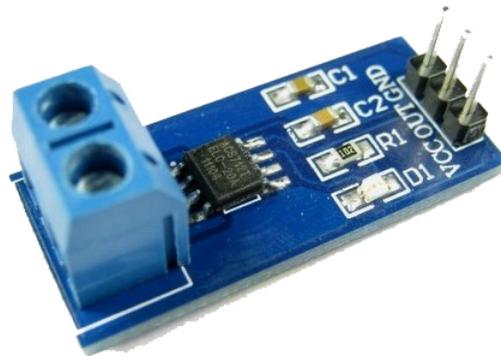


Fig. 7.23 Módulo AC712.

Para corrientes bajas

En el caso de valores menores al amperio, para medir la corriente con mayor precisión en el circuito final se implemento una medición indirecta, basada en la caída de tensión a través de una resistencia calibrada (de muy bajo valor y de muy baja tolerancia) colocada en serie con el circuito de anodización. Para determinar con precisión la caída de tensión en la misma, se

7.6 Indicadores

En el circuito diseñado existen solamente tres indicadores visuales incorporados, ya que la mayoría de los indicadores fueron implementados en el programa de instrumentación virtual. Se implementó un LED que indica que el circuito está siendo alimentado, un LED de uso opcional con una variable digital (Ya descrito en la sección 7.4.3), y por último un LED que indica el cierre del circuito de anodización. En la placa de desarrollo existen además otros dos indicadores que no fueron utilizados por razones constructivas (El eventual circuito diseñado obstruiría su visión). En el diagrama de circuito final implementado para la construcción del circuito se pueden observar los indicadores.

7.7 Controles

Existen cuatro controles implementados por Hardware, el resto de los controles se implementa a través de la interfaz mediante LabVIEW.

7.7.1 Reset

Se implementa un pulsador de reset externo para el microcontrolador. El mismo consta de un interruptor y un pequeño capacitor para lograr un efecto anti-rebotes. Se remarca que este pulsador reinicia completamente el programa del microcontrolador por lo que deben tomarse las medidas necesarias en el programa de instrumentación virtual.

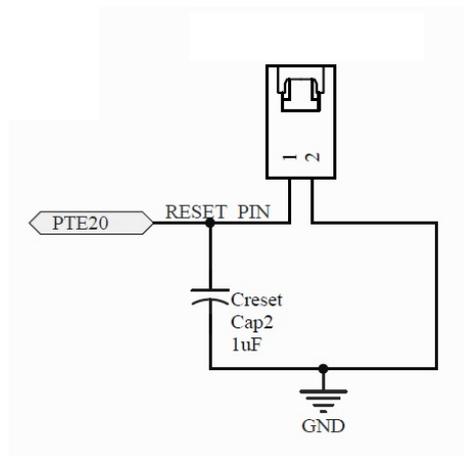


Fig. 7.25 Circuito de reset

7.7.2 Interruptores

El sistema tiene tres interruptores. Un interruptor externo de tipo llave monofásica controla la alimentación del conector monofásico al cual se conecta la fuente de alimentación. Los otros dos interruptores tienen las siguientes funciones:

Interruptor para selección de alimentación

Un interruptor acciona la alimentación externa para el microcontrolador. Debido a que la placa de desarrollo cuenta con la posibilidad de alimentarse por USB es necesario conmutar este interruptor tanto para alimentar el circuito mediante USB, como para programarlo. Este interruptor se encuentra conectado en serie con la terminal 1 del regulador de tensión, según se muestra en la figura 7.13.

Interruptor para inicio/corte del proceso de anodización

Este interruptor se encuentra en serie con la resistencia calibrada para la medición de la corriente, y coloca a masa la misma cuando no se encuentra accionado. Se utilizó una llave de 3 vías, de modo que un led conectado a la misma indica su estado (el LED encendido indica que los electrodos se encuentran conectados). Además existe la posibilidad de efectuar un corte visible en el circuito de anodización como se explicará en la sección siguiente.

7.8 Conectores

Se listan los conectores implementados en el sistema y su función:

Table 7.2 Conectores implementados en el sistema

Conectores	Función
Banana (2)	conectores para los electrodos
Banana (1)	conectores de corte visible para circuito de anodización
Header -hembra- (x4)	conector para el módulo bluetooth
Header -macho- (x2)	interruptor para selección de alimentación
Header -hembra- (x2)	pulsador de reset
Header -hembra- (x3)	conector para el sensor de temperatura
Header -macho- (x2)	variable auxiliar digital más un pin de masa
Header -macho- (x4)	control de dos servos y su alimentación
Header -macho- (x6)	módulo de la tarjeta de memoria y su alimentación
Header -macho- (x3)	selector para la variable digital auxiliar (jumper)
Ficha "DC" -hembra-	Conector para la alimentación (Centro positivo)
Tomacorriente monofásico	Conector para la fuente de alimentación

Además de los conectores listados, se implementarán conectores tipo pin para conectar el circuito externo a la placa de desarrollo, como se desarrolla en la sección de construcción del hardware.

7.9 Periféricos

Los periféricos implementados en el circuito se explican en el capítulo 4. Su implementación en conjunto con el circuito diseñado se limita a la conexión y alimentación de los mismos.

CAPÍTULO 8

Fuente de alimentación alternativa

Este capítulo describe el *marco metodológico* referente al diseño de una fuente de alimentación alternativa para poner en funcionamiento el sistema de filtrado.

8.1 Celdas Fotovoltaicas

8.1.1 Definición

Las Celdas Fotovoltaicas, también conocidas como "Paneles Solares" son dispositivos encargados de transformar la energía provista por el sol en forma de rayos de luz en energía eléctrica. El funcionamiento de estas celdas está basado en una característica propia de algunos materiales conocida como "efecto fotoeléctrico". Existen diferentes tipos de Celdas Fotovoltaicas en función de los materiales semiconductores y los métodos de fabricación que se empleen, entre los cuales se pueden listar: Silicio puro monocristalino, Silicio puro policristalino, Silicio amorfo, Telurio de Cadmio, Arseniuro de Galio y Di seleniuro de cobre en indio entre otros. Para el caso particular de este proyecto fue utilizada una celda de 3[W], ya que se pretendía construir un prototipo pequeño.

8.1.2 Fabricación

En una lámina de material semiconductor puro se introducen elementos químicos llamados dopantes que hacen que esta tenga un exceso de electrones y aunque no exista en realidad desequilibrio eléctrico (existirá el mismo número de electrones que de neutrones en el total de la plancha del semiconductor) convencionalmente se entiende que esta plancha tiene una carga negativa y se la denomina N. Por otro lado en otra lámina de material semiconductor se hace el mismo proceso pero en esta ocasión con otra sustancia dopante que provoca que haya una falta de electrones. Por esta razón se entiende convencionalmente que la plancha tiene una carga positiva y se le denomina P. Es en este punto donde se procede a realizar la unión P-N en la cual el exceso de electrones de N pasa al otro cristal y ocupa los espacios libres en P. Con este proceso la zona inmediata a la unión queda cargada positivamente en N y negativamente en P creándose un campo eléctrico cuya barrera de potencial impide que continúe el proceso de trasvase de electrones de una plancha a la otra.

8.1.3 Funcionamiento

Cuando el conjunto queda expuesto a la radiación solar, los fotones contenidos en la luz transmiten su energía a los electrones de los materiales semiconductores que pueden entonces romper la barrera de potencial de la unión P-N y salir del semiconductor a través de un circuito exterior, produciéndose así corriente eléctrica. El modulo más pequeño de material semiconductor con unión P-N y por lo tanto con capacidad de producir electricidad, es denominado célula fotovoltaica. Estas células fotovoltaicas se combinan de determinadas maneras para lograr la potencia y el voltaje deseados. Este conjunto de células sobre el soporte adecuado y con los recubrimientos que le protejan convenientemente de agentes atmosféricos es lo que se denomina Celda Fotovoltaica o Panel Solar.

La emisión electrónica aumenta cuando se aumenta la intensidad de la radiación que incide sobre la superficie de la celda ¹ (ver figura 8.2), ya que hay mas energía disponible para liberar electrones. Además se debe tener en cuenta que hay una frecuencia límite por

¹Informe final Ayudantía de Laboratorio - GRISI - Henn, Mantovani

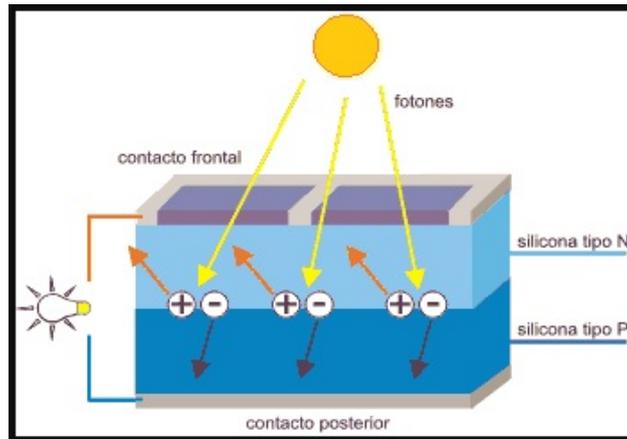


Fig. 8.1 Funcionamiento Celda Fotovoltaica.

debajo de la cual no se emiten fotoelectrones, por mas que se aumente la intensidad de la radiación.

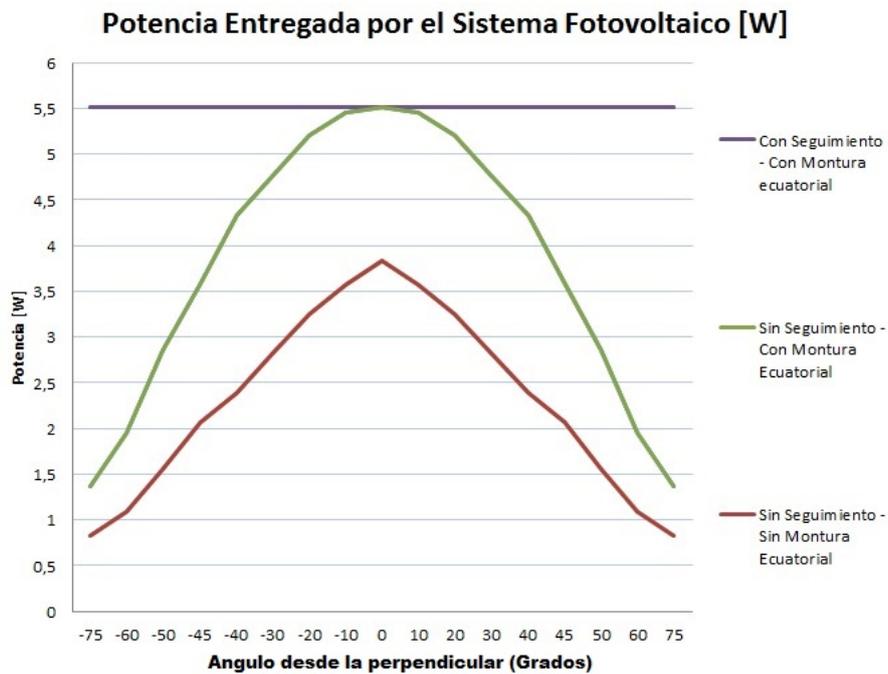


Fig. 8.2 Comparativa entre monturas de instalación para un panel solar de 5W.

La eficiencia de un panel con montura guiada es aproximadamente un 30% mayor, lo que en los objetivos de este proyecto significan la posibilidad de flocular mas material no deseado.

8.2 Administración de la tensión

8.2.1 Regulación

El uso de baterías (de plomo ácido o de litio) esta previsto como mejora a futuro, pero el circuito de regulación descrito en el capítulo 7 es capaz de regular la tensión proveniente de cualquier panel solar que cumpla con los requisitos eléctricos del sistema.

8.3 Hardware

Una vez seleccionado el dispositivo a ser utilizado para la obtención de la energía eléctrica como así también los elementos que permitirán la correcta administración de dicha energía, lo siguiente sería diseñar la estructura sobre la cual la Celda Fotovoltaica sería montada. Para esta parte del diseño fue tenido en cuenta el concepto mencionado en la sección 8.1.3 en el cual se hizo mención acerca del aumento de la emisión electrónica detectado de manera experimental al momento de aumentar la intensidad de la radiación solar incidente en la celda fotovoltaica. Por lo tanto el objetivo principal que debía cumplir la estructura a ser diseñada sería el de permitir la mayor captación de radiación solar. Como es lógico pensar la mayor captación se obtiene en el momento que la Celda Fotovoltaica se encuentra perpendicular al sol, esto es debido a que en ese momento es cuando se encuentra iluminada la mayor porción de área de la celda. Existen muchos tipos de montura que podrían haber sido utilizadas pero a continuación se detallan dos de ellas que permiten entender las diferencias fundamentales entre una montura fija y una montura guiada.

8.3.1 Montura fija

Este tipo de montura ofrece un soporte sencillo sin movimiento. Dependiendo de la latitud de la instalación y de la aplicación que se quiera dar se dotan a los paneles de la inclinación más adecuada para captar la mayor radiación solar posible. No posee un sistema de seguimiento

que lo oriente perpendicular al sol. Es la peor opción pues para un mismo panel en la misma ubicación es la que menos energía capta.

8.3.2 Montura guiada

El sol es un cuerpo celeste, y como todo cuerpo celeste que se encuentra quieto (es decir, desde nuestra perspectiva no presenta movimientos de deriva significativos en un lapso de 24 horas) describe un movimiento aparente en el cielo de tipo parabólico (8.3), resultado de la rotación terrestre. Para contrarrestar este movimiento, y poder hacer el seguimiento de un cuerpo en la bóveda celeste, existe un tipo de montura guiada denominada "Montura Ecuatorial" que alineada de forma correcta, permite seguir un objeto con tan solo un movimiento. El sol a lo largo de las estaciones presenta una pequeña deriva producto de la inclinación del eje terrestre de 23.5° , este error es posible corregirlo con un control extra en el eje de Declinación, pero por motivos prácticos y reducción de costos, este eje se podría corregir de forma manual cada cierta cantidad de días.

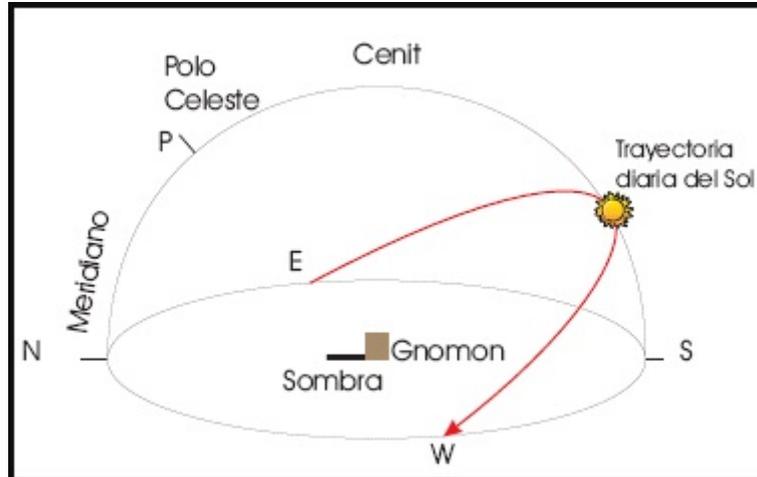


Fig. 8.3 Trayectoria diaria del sol.

Este tipo de seguimiento con montura ecuatorial es uno de los más usados en astronomía, justamente por su simplicidad y efectividad, solo que como el sol no es un objeto de estudio que requiera largas exposiciones de fotografía, o muchas horas de observación, no se utilizan sistemas de seguimiento para este astro. La montura ecuatorial cuenta con tres ejes: uno fijo

y dos móviles. Un eje móvil se corresponde con el eje ecuatorial, denominado ascension recta, y el otro, perpendicular a este, se denomina declinación. El eje fijo es la latitud, y puede fijarse según desde donde se hace el seguimiento en relación con Ecuador. En el caso del Sol, el eje de declinación resulta fijo también, ya que no es necesario desplazarse entre astros distintos.

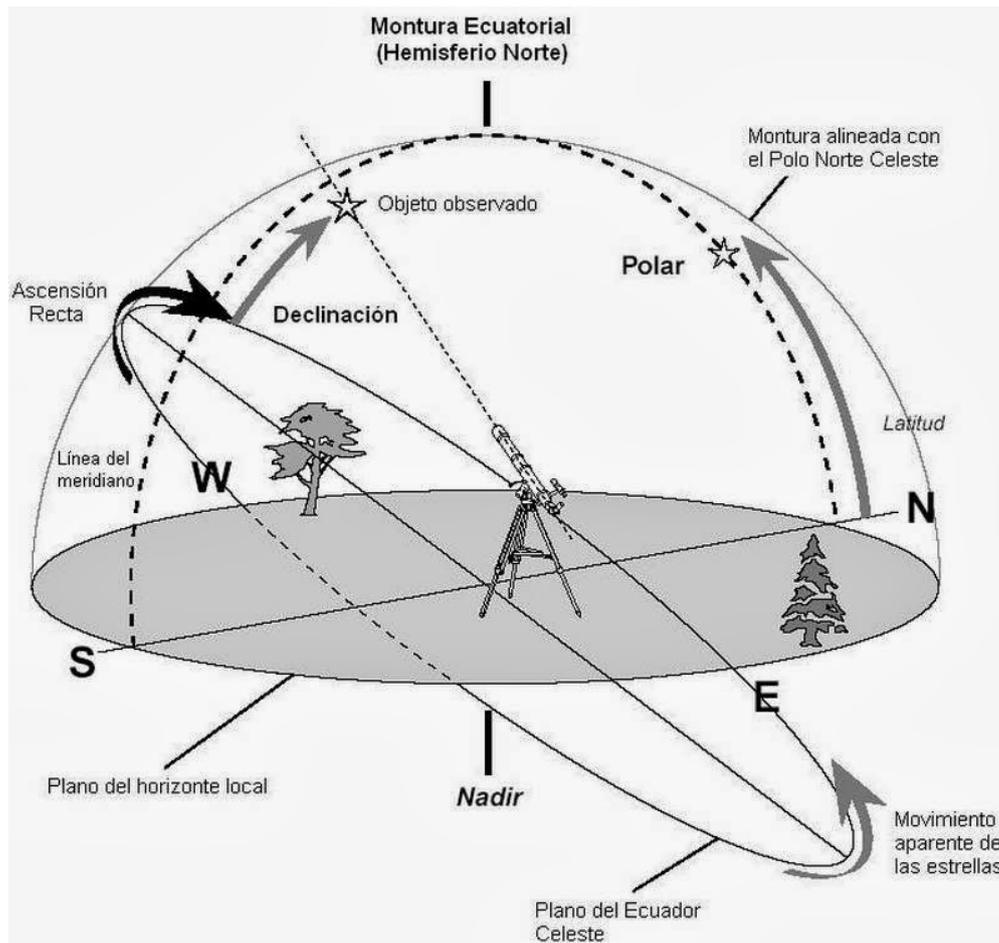


Fig. 8.4 Montura ecuatorial.

8.3.3 Diseño y Construcción

Considerando los beneficios notables que se obtienen mediante la utilización de una montura guiada se optó por construir una estructura de este tipo.

La estructura fue diseñada a través del software "SketchUp"², programa de diseño gráfico y modelado en tres dimensiones (3D) basado en caras desarrollado por Last Software.

Este programa permite realizar diseños 3D de forma sencilla y con características propias de un software profesional. En la figura 8.5 a la izquierda se encuentra el diseño original contrastado a su derecha por la estructura desarrollada para el proyecto integrador.

Existen algunas pequeñas diferencias entre el diseño y el desarrollo, principalmente en la parte encargada de efectuar el giro de la Celda Fotovoltaica. La diferencia existente es debido a que se pudo realizar una adaptación simple de la estructura de agarre entre el servomotor y el eje de giro evitando así la construcción de varios elementos. No se descarta como mejora a futuro la construcción de dichas partes mediante la utilización de una impresora 3D por lo cual se adjuntan los diseños originales.

La construcción se realizó de forma manual, utilizando fibra de madera de media densidad, y herrajes de bronce. La estructura se pintó con un protector negro.

8.4 Software

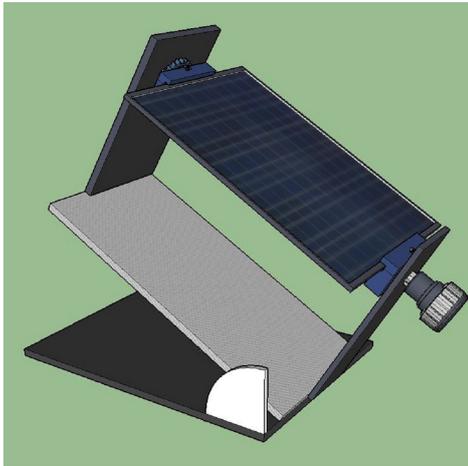
El software para realizar el seguimiento se basa en una serie de algoritmos, cuyas variables de entrada más importantes son el tiempo actual y la posición del observador. Los algoritmos astronómicos utilizados pertenecen al *Measurement and Instrumentation Team of the Solar Radiation Research Laboratory (National Renewable Energy Laboratory)*. Las librerías provistas reciben el nombre de *Solar Position Algorithm* o *SPA*.

8.4.1 Uso de la librería SPA

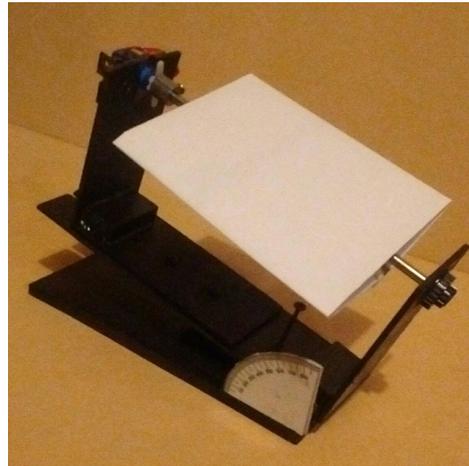
Para hacer uso de la librería, se deben asignar ciertas variables. Como se dijo, las más importantes corresponden al tiempo y la posición del aparato, pero además se incluyen variables como:

- Elevación del lugar de instalación

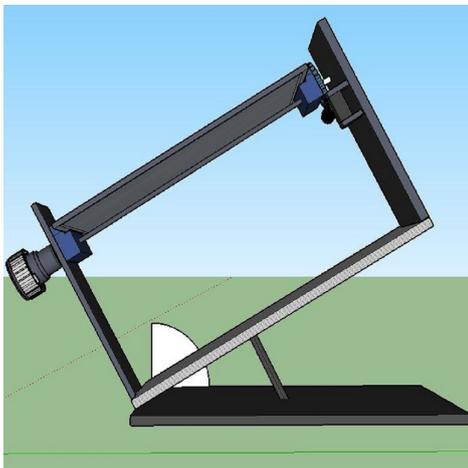
²<http://www.sketchup.com/es>



(a) Perspectiva Diseño.



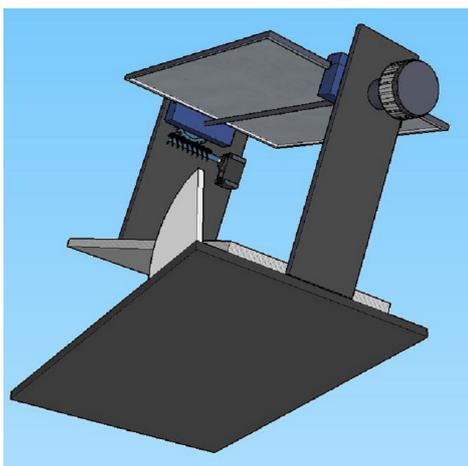
(b) Perspectiva implementada.



(c) Vista lateral Diseño.



(d) Vista lateral implementada.



(e) Vista inferior Diseño.



(f) Vista inferior implementada.

Fig. 8.5 Montura Ecuatorial, Diseño vs Desarrollo.

- Presión atmosférica
- Inclinación del terreno
- Refracción de la atmósfera
- Rotación inicial (Offset) de los ejes

A continuación se detalla la función utilizada para calcular la posición del sol en un momento determinado. Para los valores menos importantes (para el presente desarrollo) anteriormente descritos, se utilizaron valores de media mundial.

[...]

```
void configuracionAstronomica ()
{
    spa . year           = year ;
    spa . month          = month ;
    spa . day            = day ;
    spa . hour           = hour ;
    spa . minute         = minute ;
    spa . second         = second ;
    spa . timeZone       = timeZone ;
    spa . longitude      = longitude ;
    spa . latitude       = latitude ;
    spa . delta_ut1      = 0 ;
    spa . delta_t        = 67 ;
    spa . elevation      = 0 ;
    spa . pressure       = 820 ;
    spa . temperature    = 15 ;
    spa . slope          = 0 ;
    spa . azm_rotation   = 0 ;
    spa . atmos_refract  = 0.5667 ;
}
```

```
spa.function      = SPA_ALL;
spa.elevation     = 0;
result = spa_calculate(&spa);
if (result == 0)
{
    minutoAmanecer=60.0*spa.sunrise;
    minutoOcaso=60.0*spa.sunset;
}
else printf("SPA_Error_Code:_%d\n", result);
}
```

Esta función calcula los minutos de amanecer y de ocaso, contando a partir de las 00:00:00. Con estos datos es posible ejecutar un algoritmo de seguimiento como se explica a continuación.

8.4.2 Programa en el sistema embebido

El método utilizado para realizar el seguimiento, consiste en calcular la diferencia horaria entre el amanecer y el momento actual. Conocida la velocidad de movimiento del sol en grados por segundo, es posible calcular la posición inicial del panel. A partir de este punto, no es necesario ningún cálculo astronómico, simplemente se debe mover el eje de ascensión recta de la montura del panel a velocidad constante (esta velocidad es llamada "velocidad sidérea"). Teniendo esto en cuenta, es necesario comunicar al embebido el momento actual, y medir el tiempo transcurrido a partir de allí. Inicialmente se tienen las declaraciones de algunas de las funciones y variables utilizadas.

```
[...]  
void idle(void);  
void configuracionAstronomica(void);  
void moverServo(void);  
[...]
```

```

Serial      bt (PTE0 ,PTE1 ,9600);
Ticker      tickerServo ;
Ticker      tickerReloj ;
Timer       timer ;
Servo       servo1 (PTA7);
Servo       servo2 (PTD4);
spa_data    spa ;
[ ... ]

```

Para determinar el momento actual (Fecha del día), y la zona de instalación es necesario comunicar los datos mediante bluetooth (como se explica en el capítulo 4), utilizando los comandos **'H-AAAAMDDHHMMSS'** y **'Z-ZHLATLONG'**

```

void serialPC_interrupt ()
{
orden=bt.getc ();
switch (orden)
{
[ ... ]
case ( 'h' ):
case ( 'H' ):
for (i=0; i<14; i++)
{
fecha [ i ]=bt.getc ();
}
temp2=fecha ;
year=atoi ((temp2 . substr (0 ,4)). c_str ());
month=atoi ((temp2 . substr (4 ,2)). c_str ());
day=atoi ((temp2 . substr (6 ,2)). c_str ());
hour=atoi ((temp2 . substr (8 ,2)). c_str ());

```

```
minute=atoi((temp2.substr(10,2)).c_str());
second=atoi((temp2.substr(12,2)).c_str());
break;

case ('z'):
case ('Z'):
    for(i=0; i<14; i++)
    {
        zona[i]=bt.getc();
    }
    temp2=zona;
    timeZone=atof((temp2.substr(0,4)).c_str());
    longitude=atof((temp2.substr(4,5)).c_str());
    latitude=atof((temp2.substr(9,5)).c_str());
    configuracionAstronomica();
    break;
}
[...]
```

A continuación se describen ciertas funciones necesarias para la configuración del sistema. En primer lugar, es necesario calibrar el servomotor a ser utilizado. 0,001 (10[mSeg]) representa el ancho de pulso que será traducido en un movimiento de 90 grados del eje del servomotor. Luego se puede observar la declaración de un temporizador también conocido como "Ticker". Los "Tickers" sirven para que el microcontrolador efectúe una determinada actividad cada un tiempo previamente establecido. Se establece además el vínculo entre la variable utilizada para la comunicación serie "bt" y la función "serialPC_interrupt" lo que implica que al efectuarse una transmisión serie de datos el microcontrolador interrumpirá su proceso para realizar la actividad propuesta en la función indicada según el código provisto por el SIV.

```
int main ()
{
  [...]
  servo1.calibrate(0.001,90);
  idle ();
  tickerReloj.attach(&ticTac,60);
  idle ();
  bt.attach(&serialPC_interrupt);
  idle ();
  tickerServo.attach(&moverServo,600);
  idle ();
  [...]
```

La función "idle", se encarga de realizar un retardo entre configuraciones y advertir al usuario que el sistema se está configurando conmutando la variable digital auxiliar en el sistema (Ver capítulo 9), para permitir que no ocurran errores, considerando que al mismo tiempo se puede estar iniciando el sistema de instrumentación virtual.

```
void idle ()
{
  wait(0.3)
  aux=!aux;
}
```

La función "tickerReloj" se encargará de llamar a la función "ticTac" cada 60[Seg]. La función "ticTac" no es ni mas ni menos que un reloj, cada vez que es llamada aumenta un contador denominado "minute" en uno, una vez que "minute" llega a 60 (lo cual ocurrirá al transcurrir una hora en tiempo real) el contador "hour" aumenta en uno y "minute" es llevado a cero nuevamente. Cuando "hour" llegue a 24 se vuelve a cero para reiniciar el ciclo. Para

realizar el seguimiento del sol, un minuto es más que suficiente para llevar la cuenta del tiempo.

```
void ticTac ()
{
  minute++;
  if (minute==60)
  {
    hour++;
    minute=0;
  }
  else if (hour==24)
  {
    hour=0;
  }
}
```

Por ultimo en el bloque de configuraciones se encuentra el "Ticker" encargado de llamar a la función "moverServo" cada 600[Seg] (10[Min]). Al principio dentro de la función se desactivan las interrupciones, de manera tal de poder efectuar el proceso sin interrumpirlo. En "minutoActual" se almacena la hora actual llevada a minutos. La variable "grados" almacena los grados que debe girar el servomotor para poder realizar el seguimiento del sol manteniendo la perpendicularidad para lograr mayor eficiencia en la adquisición de energía. Los grados de giro se calculan en función de la diferencia existente entre el horario actual y el horario de amanecer, ambos en minutos, multiplicado por un factor que representa cuantos grados se mueve el sol por cada minuto transcurrido. Luego se considera la amplitud útil del sol para realizar el movimiento, entre 10[grados] y 170[grados]. En el caso que el valor en grados obtenido se encuentre fuera del rango se envía una señal al servomotor para que gire la estructura hacia el Este, esto ocurrirá por ejemplo cuando se haya producido el atardecer con

lo cual el seguimiento solar deja de ser útil. Los grados obtenidos se "traducen" a ancho de pulso con el objetivo de poder aplicar este último al servomotor obteniendo el giro necesario.

```
void moverServo ()
{
  NVIC_DisableIRQ(UART1_IRQn);
  minutoActual=hour*60+minute;
  grados=(minutoActual-minutoAmanecer)*0.25;
  if((10<grados)&&(grados <170))
  {
    pulse=1.000-((float)grados/(float)180);
    servo1.write(pulse);
  }
  else
  {
    while (pulse <0.950)
    {
      pulse=pulse+0.006;
      servo1.write(pulse);
      wait(0.05);
    }
  }
  NVIC_EnableIRQ(UART1_IRQn);
}
```

8.5 Instalación

Para alinear correctamente la montura ecuatorial, se debe orientar el la misma hacia el polo sur celeste y luego elevar el angulo de latitud de la zona correspondiente. En la ciudad de

Córdoba, por ejemplo, la latitud es de 32° aproximadamente. Luego se dice que la montura está “en estación”, y puede quedar así indefinidamente. Una vez realizado este procedimiento solo resta dar inicio al programa embebido en la placa de desarrollo y el seguimiento solar será posible.

8.6 Análisis de Costos

Las celdas solares tienen un costo aproximado de 1 dólar estadounidense por Watt (al por menor). El servomotor dependerá del tamaño y peso de la celda solar, por lo que el costo del mismo es variable. El servomotor utilizado tiene un costo de 10 dólares. Los materiales utilizados para construir la estructura de la montura no entran en este análisis, ya que la elección de que materiales utilizar es a criterio del desarrollador.

CAPÍTULO 9

Diseño y construcción del circuito impreso

En este capítulo se desarrollará el *marco metodológico* correspondiente al diseño y construcción del circuito electrónico que funcionará en conjunto con la placa de desarrollo.

9.1 Consideraciones preliminares de diseño

El circuito impreso se diseñó mediante el software "Altium", las librerías de componentes necesarias y modelos en tres dimensiones son de código abierto o diseñados por los autores de este proyecto integrador. Se requirió que la placa diseñada pudiera ser acoplada directamente a la placa de desarrollo, evitando así el uso de cables y una mayor robustez. Para ello se soldaron conectores hembra a la placa de desarrollo, previendo que la placa diseñada cuente con pines macho de forma complementaria. El circuito impreso fue realizado mediante el método de serigrafía y posterior tratamiento con ácido férrico, por lo cual se estableció un criterio de diseño para las pistas que implica que las mismas deberán contar con un grosor no menor a un milímetro y un espacio entre conductores no menor a 0.5 milímetros. Estas consideraciones deberían poner la construcción de la placa al alcance para cualquiera que desee construirla y no cuente con elementos profesionales. El material a utilizar será FR4 (Comunmente denominado "Fibra") para una mayor duración. Los agujeros serán de 0.6[mm] y 1.0[mm]. Se realizará un "Layout" en papel adhesivo y se tratará la placa con

aislante a base de resina. Las soldaduras implementadas serán con un material compuesto de estaño y plomo en una relación 70/30.

9.1.1 Obtención del circuito de la placa de desarrollo

Con el objetivo de diseñar el circuito de modo que el mismo encastre en la placa de desarrollo, fue necesario obtener los diagramas de la placa de desarrollo. Los mismos son brindados por el fabricante; En particular, el archivo *gerber* que puede obtenerse desde la página de NXP contiene los dos parámetros útiles para esta parte del diseño: La posición de los pines y las dimensiones de la placa de desarrollo. En la figura 9.1 se puede observar un ejemplo, tomado del plano de dimensiones de la placa de desarrollo. En las figuras 9.2 y 9.3 se puede apreciar el resultado de importar los archivos gerber en Altium.

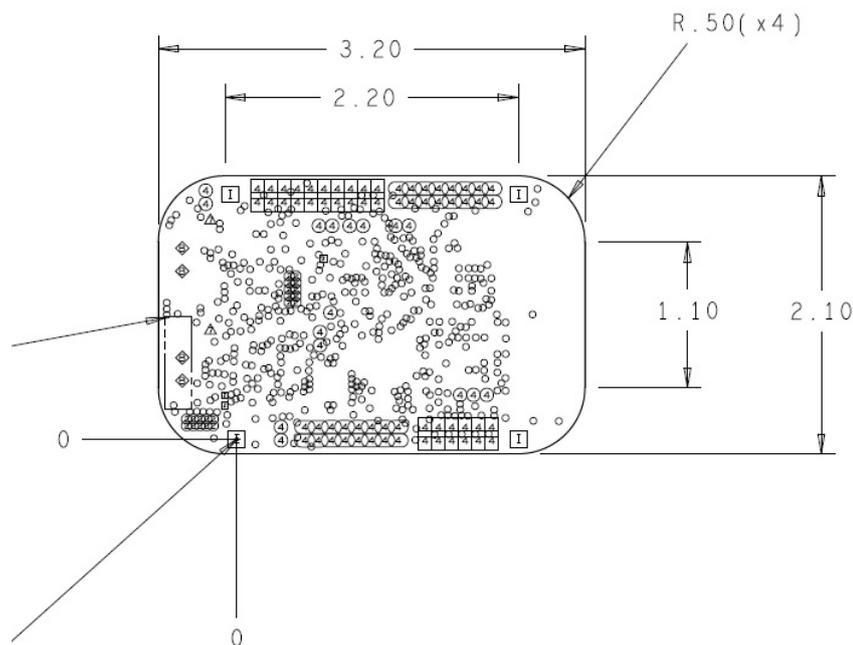


Fig. 9.1 Plano de dimensiones de la placa de desarrollo.

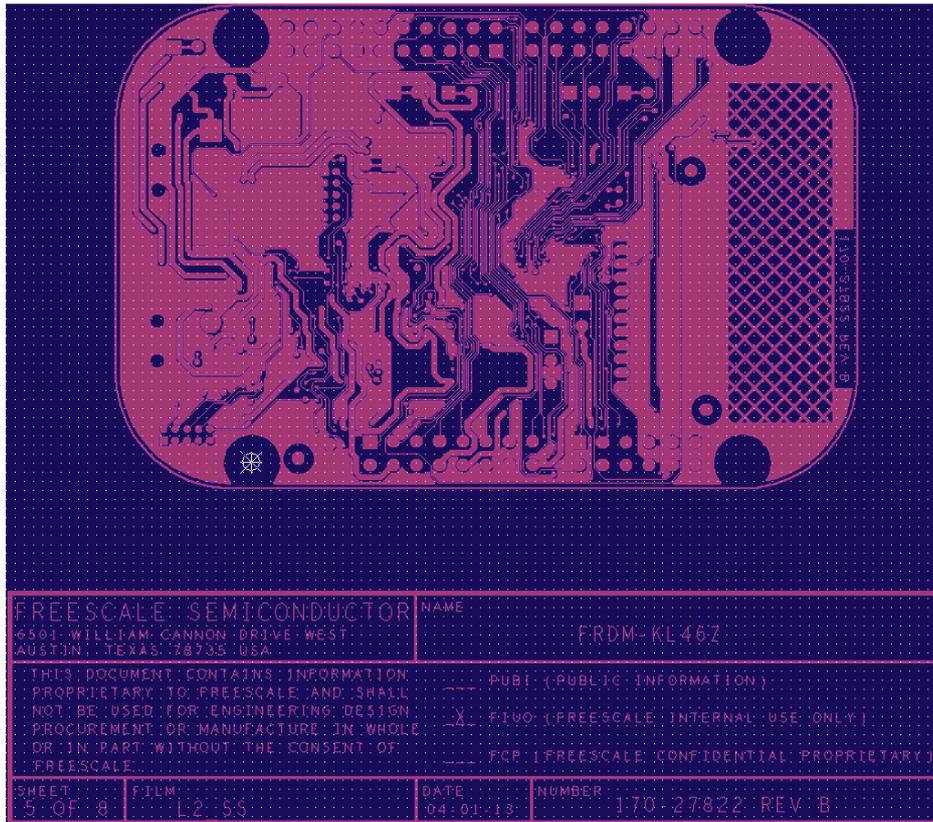


Fig. 9.2 Circuito impreso de la placa de desarrollo.

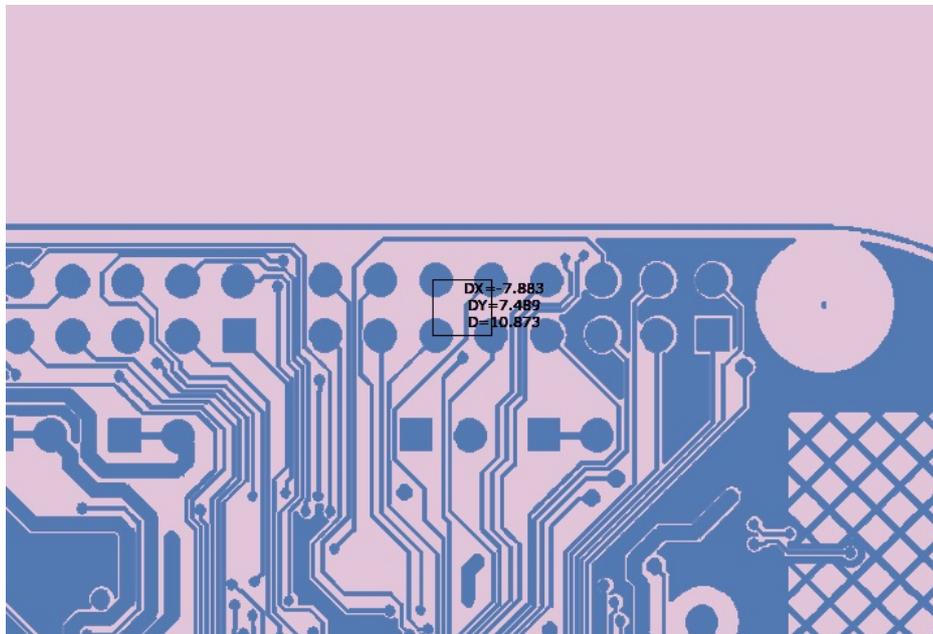


Fig. 9.3 Detalle sobre el circuito impreso de la placa de desarrollo.

9.1.2 Diagrama de pines (*Pin-out*)

El diagrama de pines de la placa de desarrollo se presenta en la figura 9.4, la placa diseñada se posicionará por encima de ella. Los pines utilizados en la placa y su función se presentan en la tabla 9.1.

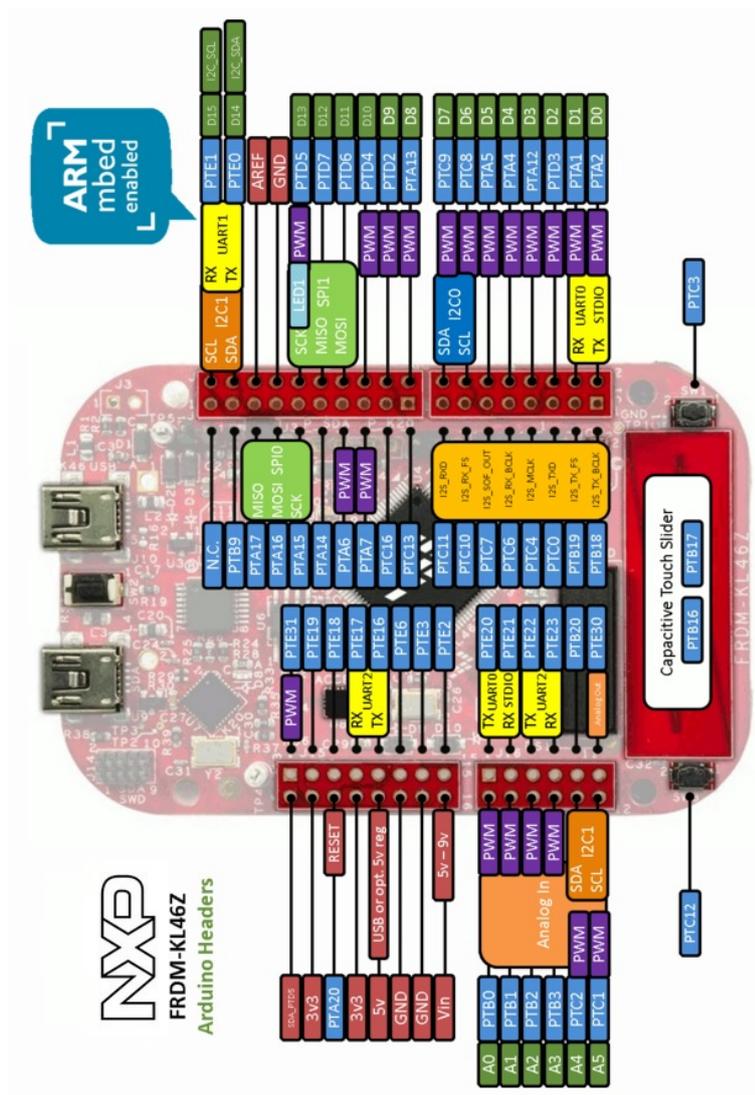


Fig. 9.4 Diagrama de pines de la placa de desarrollo.

Table 9.1 Pines utilizados en la placa de desarrollo

Conectores	Función
PTE1,PTE0	RX y TX del Bluetooth
PTA12, PTA16, PTA15	MISO, MOSI, y SCK de la tarjeta SD
PTA6	Salida PWM para el SERVO
PTD4	Salida PWM para el SERVO
PTA20	RESET
3v3	N/C - pin de soporte
5V	N/C - pin de soporte
GND	GND
VIN	VCC5 (Tensión del regulador)
PTB2	Entrada analógica para la tensión de la resistencia calibrada
PTB3	Entrada analógica para la tensión del sensor de Temperatura
PTC2	Entrada analógica para medir la tensión del DAC
PTE30	Salida analógica (DAC)

9.2 Esquemático final

El esquemático final se puede observar en el Anexo 1. Este esquemático fue utilizado para generar las reglas del circuito impreso.

9.3 Circuito impreso

El circuito impreso o PCB, fue desarrollado para una placa de dimensiones ligeramente mayores a la placa de desarrollo, por un margen muy pequeño. Los componentes de regulación de tensión fueron colocados en el margen de la placa diseñada que se encuentra por encima de los conectores USB en la placa de desarrollo. Se tuvo especial cuidado en no colocar componentes sensibles al calor en las cercanías del regulador de tensión, el cual cuenta con espacio disponible para colocar un disipador. Se utilizó polígono conectado a la red GND que constituye el plano de masa de la placa. La placa diseñada se puede observar en la figura 9.5

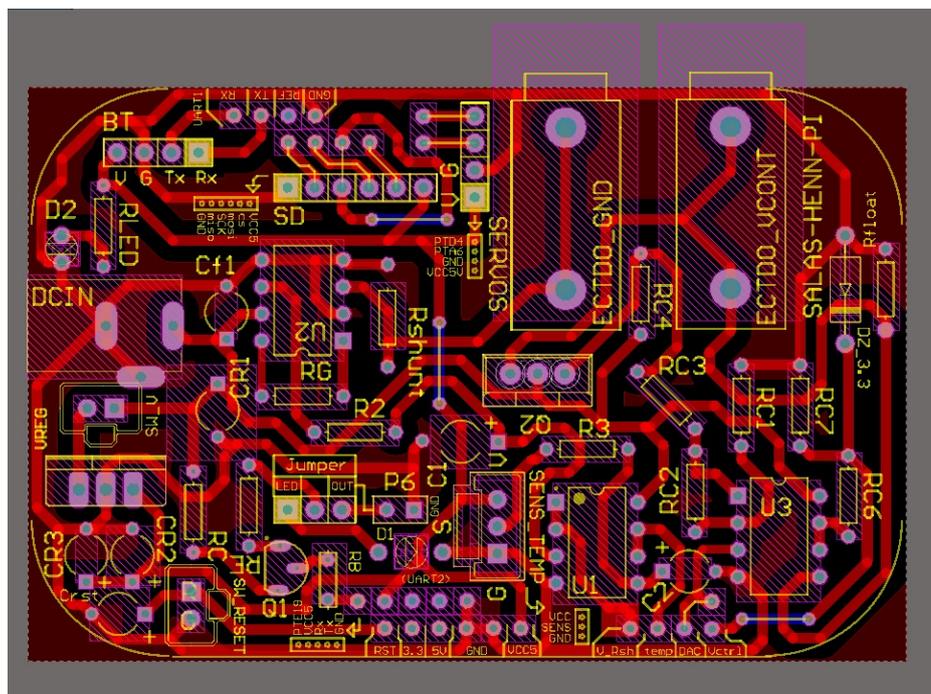


Fig. 9.5 *Circuito impreso terminado.*

9.3.1 Plano para serigrafía

Para poder traspasar el diseño mediante serigrafía se genera un archivo pdf a escala 1:1, el cual se imprime en papel fotográfico. El mismo se puede observar en la figura 9.6 y se encuentra en el DVD adjunto por si surge la necesidad de desarrollar otra placa.

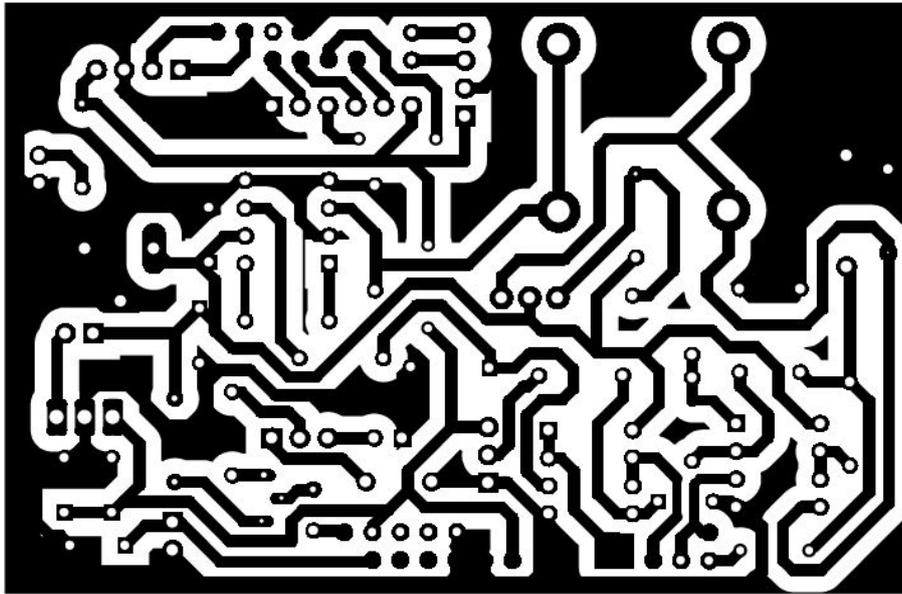


Fig. 9.6 *Figura para impresión.*

9.3.2 *Layout*

Se denomina "Layout" a la parte superior de la placa, la cual lleva indicaciones sobre componentes, conexiones, autores, dimensiones, etc... La misma fue impresa en papel auto adhesivo protegido por contact. También generado en un archivo pdf a escala 1:1, el mismo se puede observar en la figura 9.7, también incluido en el DVD adjunto.

9.4 Aspecto final simulado

Con el objetivo de tener un modelo de la placa terminada, se simula la misma con componentes en tres dimensiones (Figuras 9.8, 9.9, 9.10).

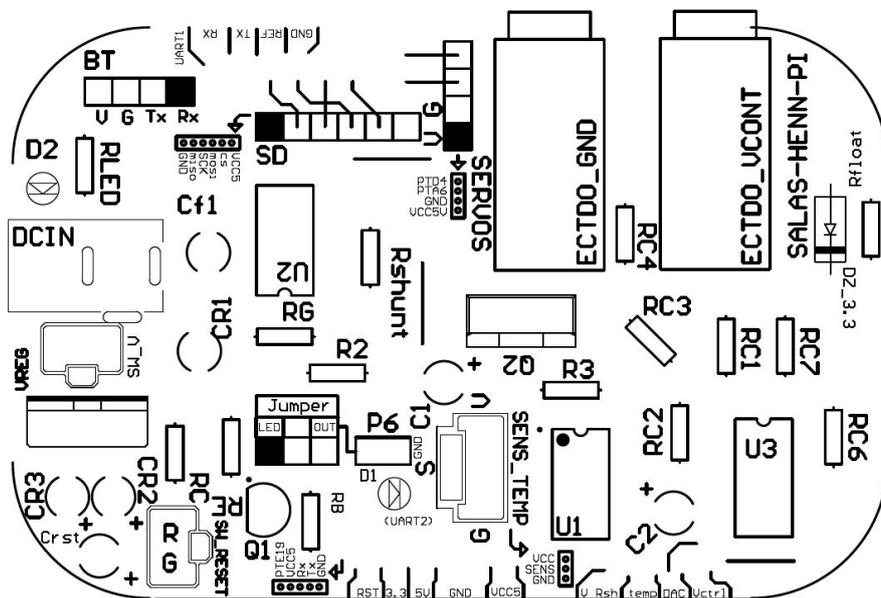


Fig. 9.7 Figura para impresión (Layout).

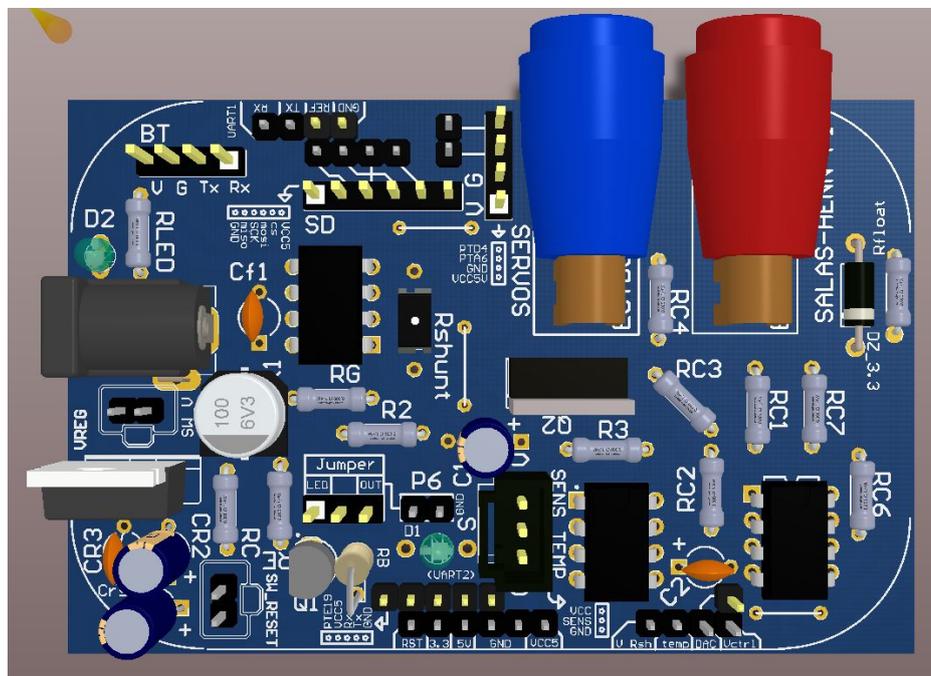


Fig. 9.8 Circuito construido - Aspecto final simulado (1).

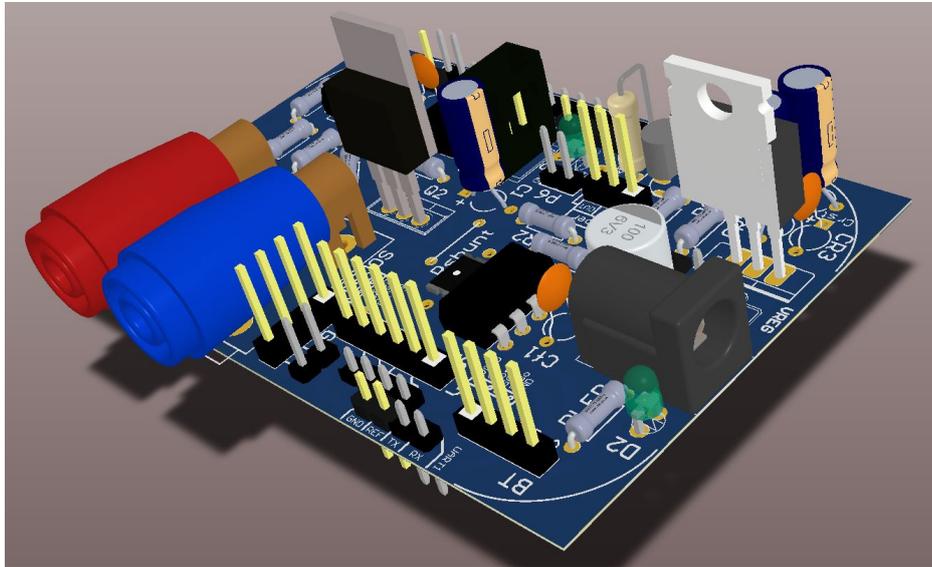


Fig. 9.9 Circuito construido - Aspecto final simulado (2).

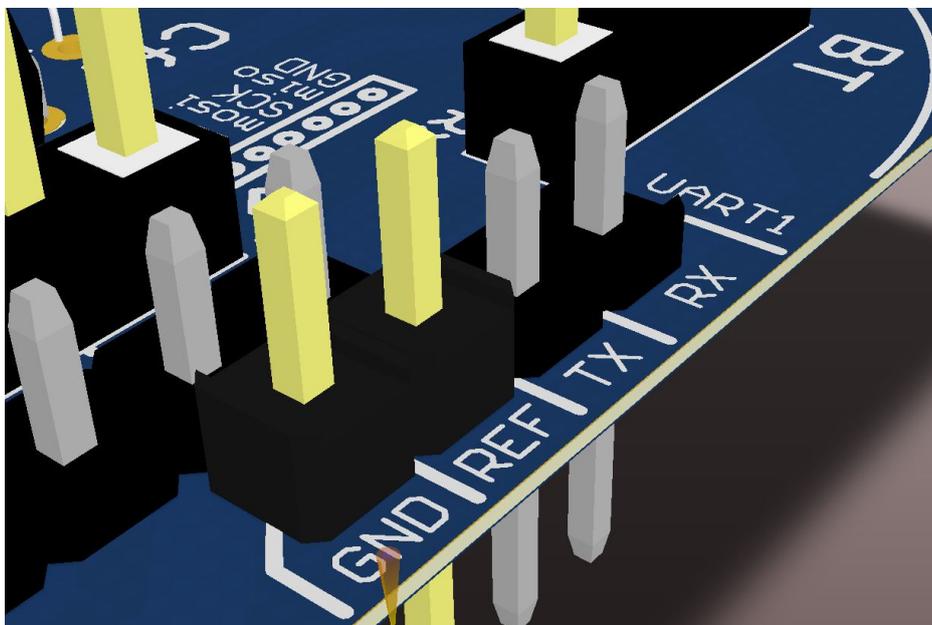


Fig. 9.10 Circuito construido - Aspecto final simulado (3).

9.5 Construcción

La construcción del circuito impreso no presenta mayores dificultades. Se recomienda utilizar papel fotográfico de alto gramaje previamente impreso mediante láser, y realizar el traspaso de tóner a 100 grados centígrados por no más de 2 minutos presionando firmemente. El tiempo aproximado de tratamiento ácido es de 15 minutos. Se puede observar el circuito impreso construido en la figura 9.11. El aspecto final, una vez soldados todos los componentes, se muestra en las figuras 9.12 y 9.13.

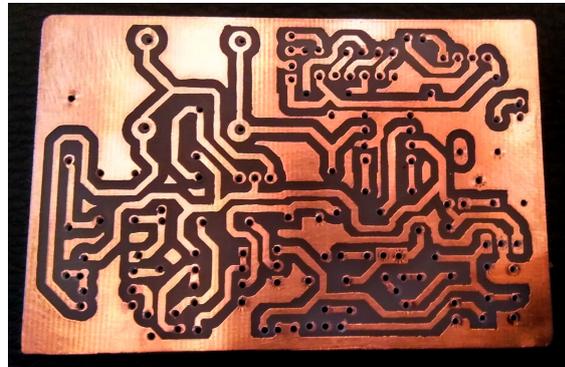


Fig. 9.11 Circuito impreso implementado.

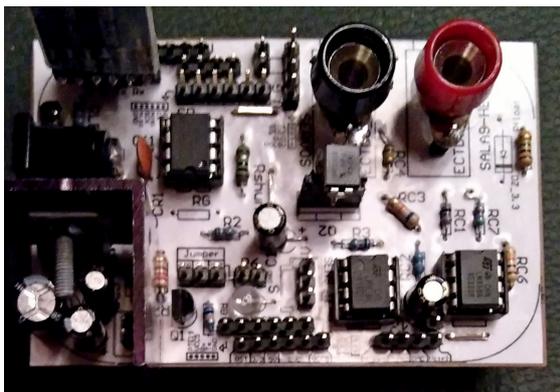


Fig. 9.12 Aspecto final del circuito implementado.

A su vez en la figura 9.14 se puede observar en detalle la forma de acoplar la placa de desarrollo con el circuito construido. Fueron utilizados conectores hembra en la placa de desarrollo, y conectores macho soldados superficialmente en la placa construida.

Se colocaron zócalos para integrados con encapsulado DIP8 para proteger los componentes al momento de soldarlos. Se dispuso además un disipador de aluminio y grasa disipadora para el regulador de tensión. Además fue colocado un conector hembra en los terminales del MOSFET, (el cual está preparado para colocar un dispositivo con encapsulado TO-220), ya que se implementa otro tipo de transistor.

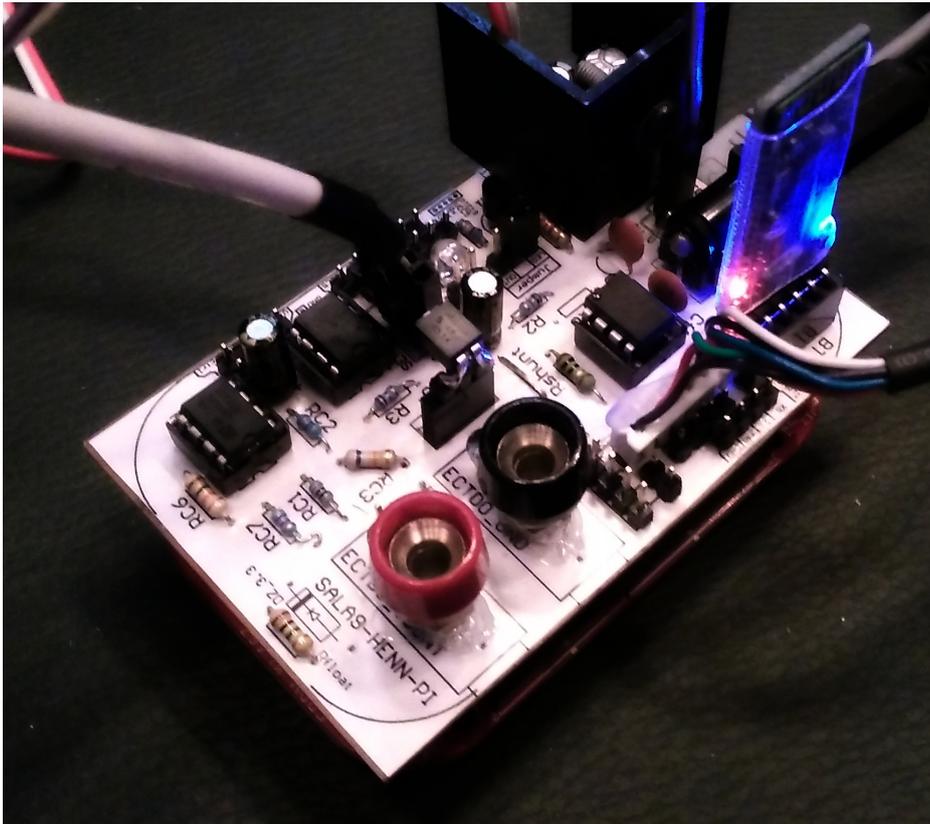


Fig. 9.13 Aspecto final del circuito implementado (perspectiva).

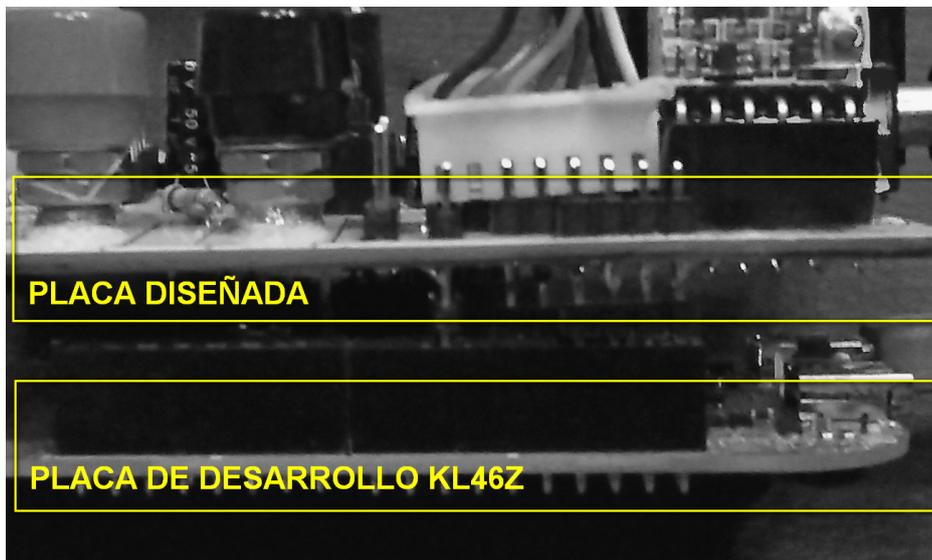


Fig. 9.14 Detalle del acople entre circuitos.

9.6 Componentes y costos

9.6.1 Lista de componentes - "BOM" *Bill Of Materials*

Table 9.2 Lista de componentes utilizados

Componente	Cantidad	Descripción
Diodo Zenner	1	3.3 Volt
2N3904	1	NPN General Purpose Amplifier
AD620BN	1	Low-Cost, Low-Power Instrumentation Amplifier
BANANA	2	Conector banana
Capacitores	7	2x100uF,3x1uf,1x100pF,1x100nF
CGRID2-V	2	Conector pines x2
CGRID3-V	1	Conector pines x2
HEADER-1X3	1	Pines
HEADER-1X4	2	Pines
IRFD110	1	MOSFET
L7805	1	Regulador lineal de 5 Volt
LED	2	Diodo emisor de luz
LM358N	2	Dual Operational Amplifier
Header-1x2	1	Header, 2-Pin
Resistores	14	3x10K, 3x1K, 1M, 68K, 150K, 470K, 100K, 2x220, 150
Ficha DC	1	Connector, Power Jack, Mini .08
Resistencia Calibrada	1	Resistencia menor a 10 Ohm 1%

9.6.2 Otros materiales necesarios y componentes alternativos

Además de los componentes listados en la sección anterior, en el desarrollo se utilizan:

- Zócalos para integrados DIP8 (3)
- Cable multifilar (0.5mm y 1mm)
- Llaves selectoras (2)
- Jumper (1)
- Conectores banana macho (5)

9.6.3 Análisis de Costos

Se presenta una tabla de costos (en dólares estadounidenses) según los precios del mercado local ¹, o aquellos publicados por fabricantes², al por menor. A partir de dicha tabla se obtiene un costo aproximado para los componentes de 19 US\$. A este total se le debe sumar aproximadamente 5 dolares de llaves, conectores y una placa de FR4 para la construcción. El costo de los insumos para la construcción del circuito no están considerados.

Table 9.3 Costo de los componentes electrónicos

Componente	Cantidad	Costo total (US\$)
Diodo Zenner	1	0.5
2N3904	1	0.25
AD620BN	1	9
BANANA	2	1
Capacitores	7	2
CGRID2-V	2	0.1
CGRID3-V	1	0.1
Conector-3 pines	1	0.1
Conector-4 pines	2	0.1
IRFD110	1	1.5
L7805	1	1
LED	2	0.2
LM358N	2	1
Header-1x2	1	0.1
Resistores	14	0.14
Ficha DC	1	1
Resistencia Calibrada	1	1

En cuanto a la placa de desarrollo en sí, la misma tiene un costo de 33 US\$ en el mercado local, y tanto el módulo BlueTooth como el modulo para la tarjeta SD cuestan aproximadamente 10 US\$.

¹<http://tienda.electrocomponentes.com/> - Consultada en Junio 2017

²<https://www.arrow.com/> - Consultada en Junio 2017

CAPÍTULO 10

Simulaciones avanzadas, pruebas y resultados

En este capítulo se describirán funcionalidades, operaciones, mediciones y simulaciones, los cuales constituyen el modelo experimental y la presentación de resultados.

10.1 Toma de datos para la corriente de anodización

10.1.1 Simulación

Como se explico en capítulos anteriores, la señal de tensión correspondiente a la corriente que circula por la resistencia calibrada es filtrada y amplificada mediante hardware, (Ver subsección 7.2.1) pero además recibe un tratamiento especial mediante software. Al promediar muestras en determinados intervalos de tiempo se constituye un filtro digital pasa-bajas. Para simular el comportamiento del sistema, utilizamos el software Simulink. En el mismo implementamos un sistema sometido a una señal compuesta de una componente continua de 5 Voltios, una componente alterna de 50Hz y 100mV, y un generador de ruido gaussiano de media cero y varianza 100mV, como se muestra en la figura 10.1.

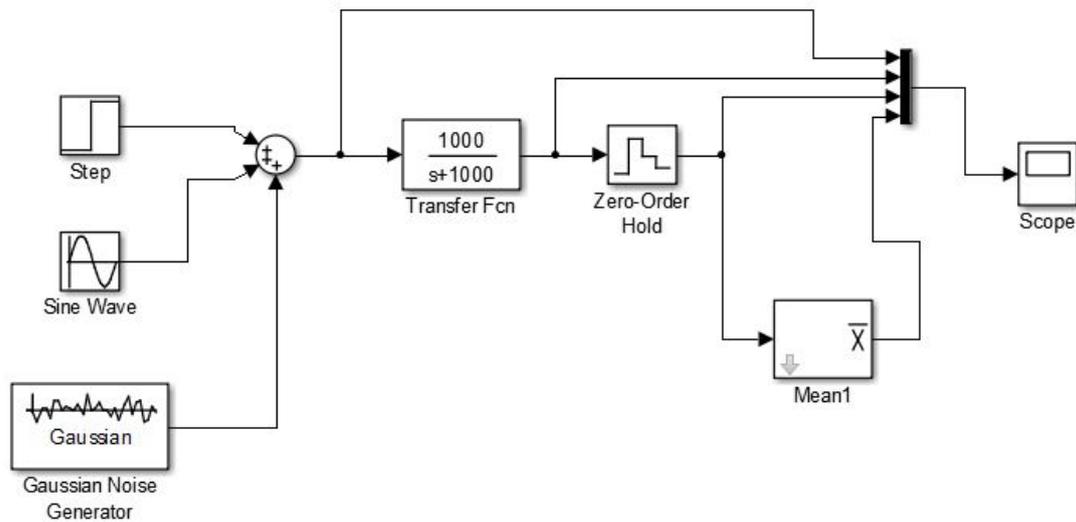


Fig. 10.1 Simulación completa para mediciones de corriente

El período de muestreo para la simulación es de 100 [mS, y el intervalo entre promedios es de dos segundos, parámetros comunes para el uso del sistema desarrollado. Es evidente que los valores utilizados extreman los valores de ruido esperados en el sistema, según las mediciones presentadas en secciones anteriores. El resultado es una señal variable, cuya media se aproxima a la señal original, como se observa en la figura 10.2.

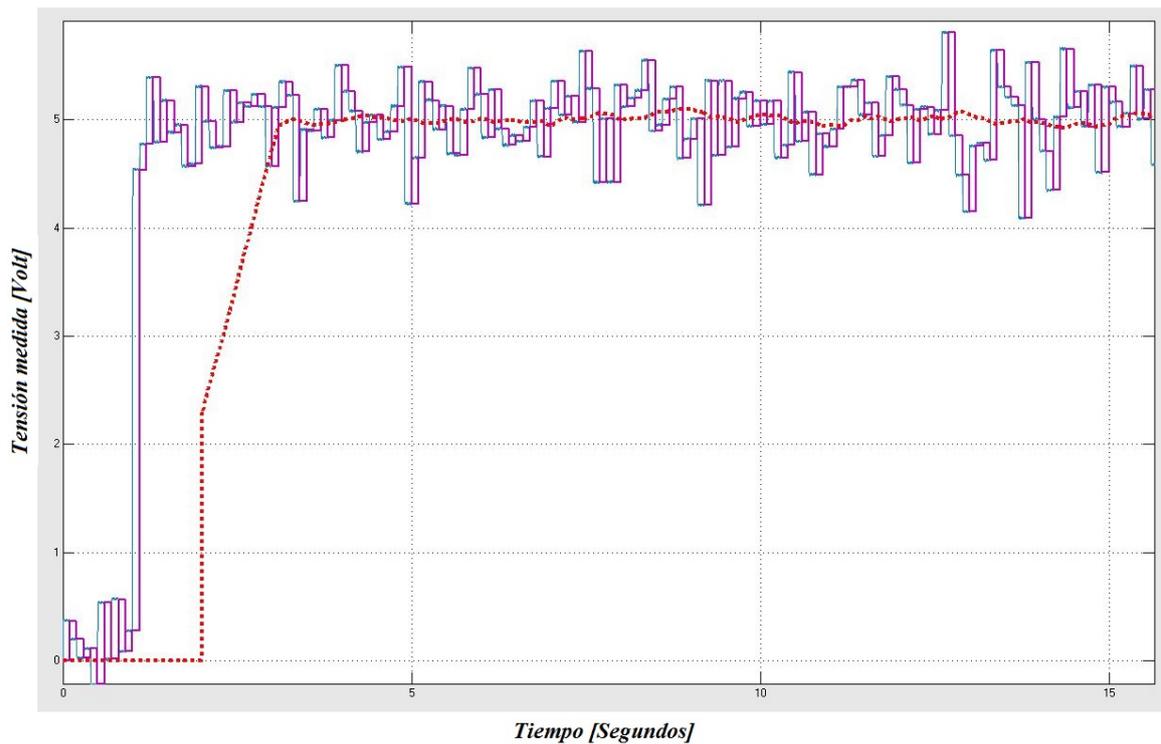


Fig. 10.2 Resultado de la simulación para mediciones de corriente

(En rojo el promedio acumulado, en magenta la señal filtrada, y en azul la señal original). Analizando en detalle, es posible atenuar las señales involucradas y resaltar (En Verde) el promedio acumulado transcurridos los dos segundos de intervalo entre promedios ya mencionado. (Figura 10.3)

Resulta todavía mas evidente la potencia del filtro digital. Para establecer límites de error en la señal, podemos determinar un intervalo de $+150\text{mV}$, -150mV el cual nunca es superado por la señal filtrada, como se muestra en la figura 10.4, mientras que en la figura 10.3 se observan picos de ruido de hasta 1 Voltio. Aún tomando en cuenta que se simula con casos de ruido extremos, la reducción es del 85%.

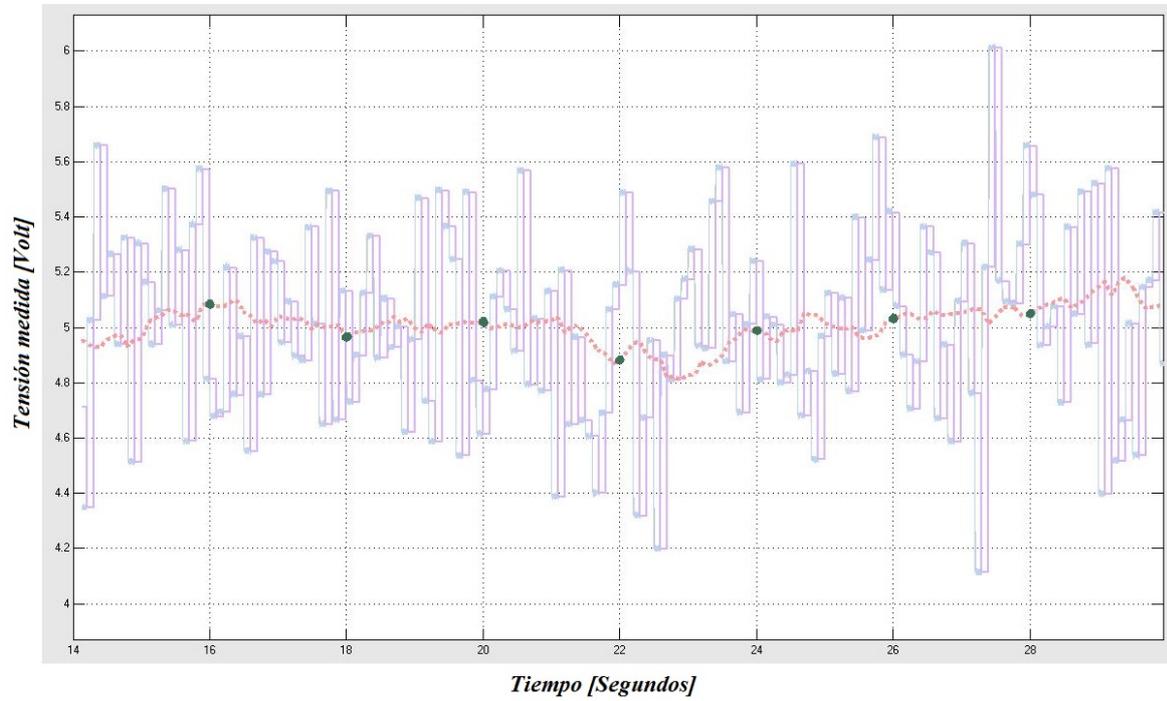


Fig. 10.3 Simulación para mediciones de corriente, detalle

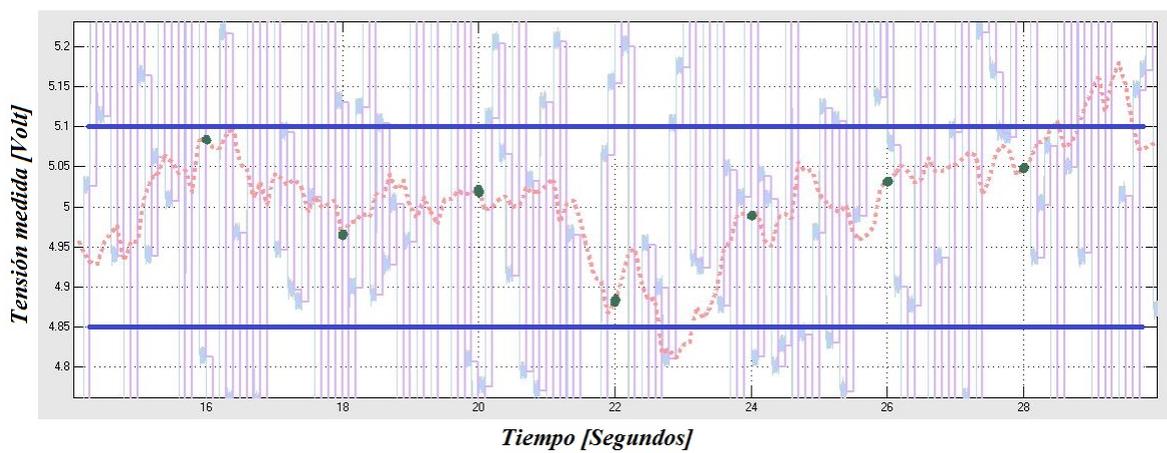


Fig. 10.4 Simulación para mediciones de corriente, límites

10.1.2 Pruebas

Los resultados fueron significativamente mejores que los simulados, debido a que el ruido al cual esta sometido el sistema es mucho menor a los parámetros elegidos para la simulación. Las variaciones de tensión pico medidas fueron menores a 10 milivoltios. En la figura 10.5 se analiza la corriente sobre una resistencia de 1000 ohmios (Tolerancia 1%), de modo que el eje de ordenadas en mili amperios represente el mismo valor en mili voltios.

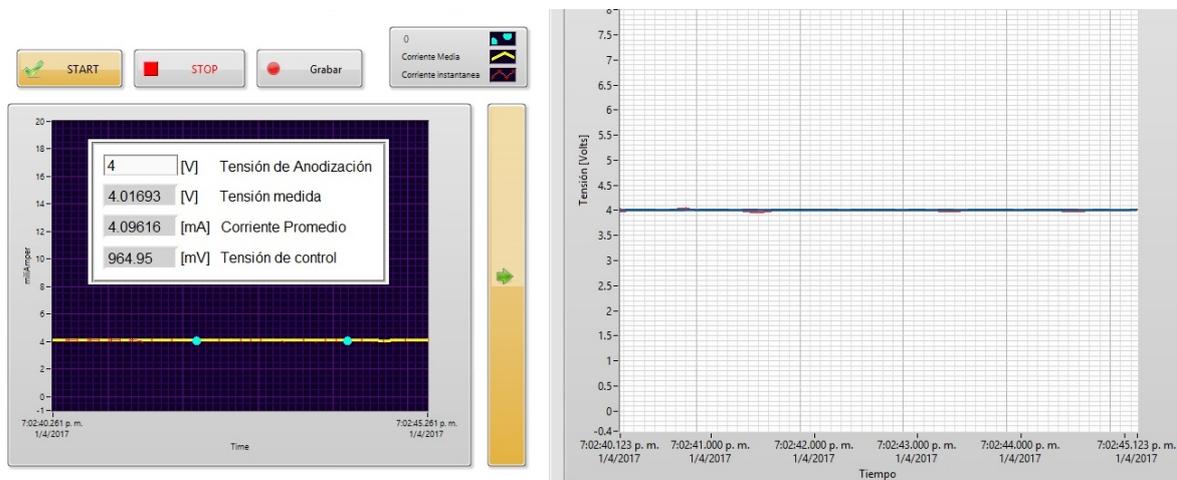


Fig. 10.5 Prueba de medición de corriente

10.2 Control de tensión de anodización

Junto con los cálculos analíticos, algunas simulaciones a lazo abierto de este módulo se pueden apreciar en el capítulo 7.4.2. Estas simulaciones presentan el comportamiento del sistema a lazo abierto, pero como ya se mencionó el sistema de control de tensión se realizará a lazo cerrado.

10.2.1 Prueba de linealidad a lazo abierto

Se ensambló el módulo por separado, y se utilizó una fuente de tensión variable a la entrada del sistema. Se pretende que ante variaciones de tensión a la entrada exista una señal de

tensión a la salida dependiente de la entrada en una relación lineal. En la figura 10.6 se puede observar el resultado de la prueba, en azul se observa la regresión lineal de los datos medidos.

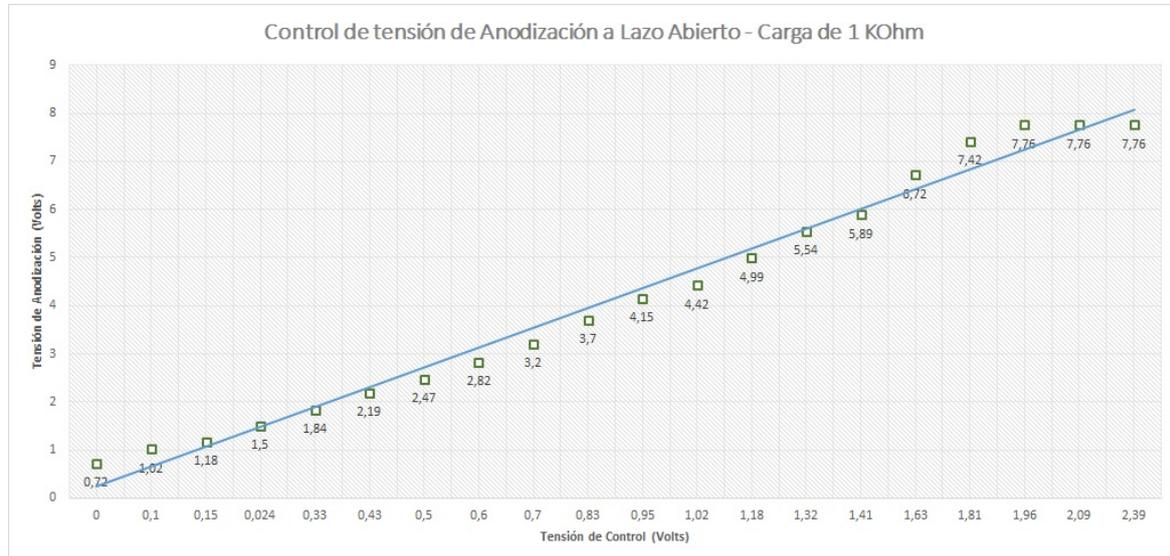


Fig. 10.6 Sistema de control - prueba de linealidad a lazo abierto

Table 10.1 Mediciones para la prueba de linealidad a lazo abierto

Tensión de Control (Volts)	Tensión de Salida (Volts)
0	0,72
0,1	1,02
0,15	1,18
0,024	1,5
0,33	1,84
0,43	2,19
0,5	2,47
0,6	2,82
0,7	3,2
0,83	3,7
0,95	4,15
1,02	4,42
1,18	4,99
1,32	5,54
1,41	5,89
1,63	6,72
1,81	7,42
1,96	7,76
2,09	7,76
2,39	7,76

A simple vista, los datos se ajustan apropiadamente a recta. Se obtiene el coeficiente de correlación de Pearson:

$$\frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = 0.989$$

El cual, al ser muy cercano a la unidad, indica una fuerte correlación directa positiva.

10.2.2 Pruebas a lazo cerrado

Las pruebas del sistema a lazo cerrado fueron muy satisfactorias. Se midió mediante un multímetro la tensión a electrodos con 4 y 6 volts como referencia, como se puede ver en la figura 10.7.

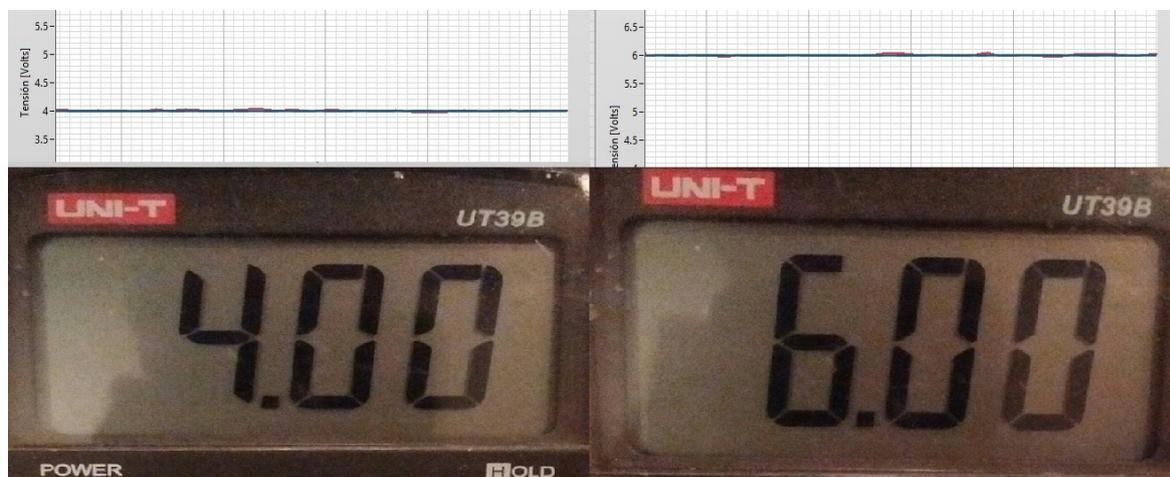


Fig. 10.7 Medición de la tensión a lazo cerrado - multímetro

El sistema de control implementado se puede aproximar por el diagrama presentado en la figura 10.8. El modulo de actuación está conformado por un amplificador operacional en configuración no inversora, y un bloque basado en un transistor MOSFET, como fue presentado en secciones anteriores. La ganancia K a la cual se somete la señal de error, es determinada por software, y la ganancia del lazo es determinada por las resistencias $RC6$ y $RC7$ en el circuito implementado (Ver Anexo 1). Modelar este sistema de forma analítica resultaría en un sistema muy complejo debido a los componentes involucrados, por lo que se aproximará por un sistema de segundo grado analizando la respuesta transitoria del mismo.

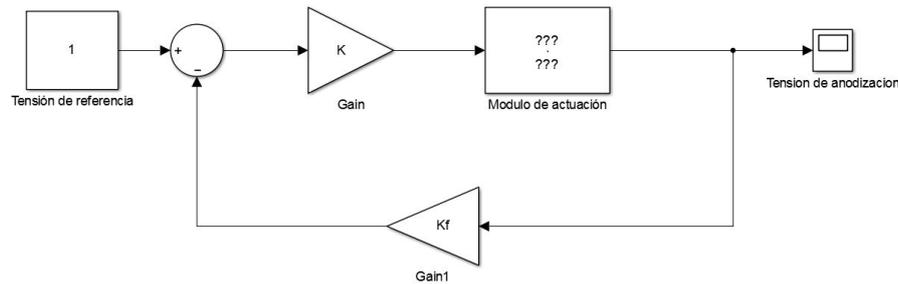


Fig. 10.8 Diagrama del sistema de control implementado

10.2.3 Modelo del sistema a lazo cerrado

Se estableció que uno de los objetivos del proyecto integrador, es su uso didáctico en distintas áreas académicas. En vista de ello y para contar con un modelo del sistema que pueda predecir el comportamiento del sistema de control de tensión, se analiza la respuesta ante una excitación de tipo "escalón" o *step response* como se muestra en la figura 10.9

Analizando en detalle el transitorio, es posible obtener los parámetros necesarios para aproximar un modelo de segundo grado (Figura 10.10).

La prueba se realiza con un escalón de 4 voltios, a partir de un *offset* de 2 voltios, debido a la imposibilidad que existe de asegurar 0 voltios a la salida del sistema. Analizando los datos tenemos que:

$$Mp = \frac{Y_{pico} - Y_{ss}}{Y_{ss}} = 0.1875$$

por otro lado, podemos determinar el coeficiente de amortiguamiento, (coeficiente de "*damping*" o de amortiguamiento):

$$\xi = \sqrt{\frac{\ln^2(Mp)}{\ln^2(Mp) + \pi^2}} = 0.4702$$

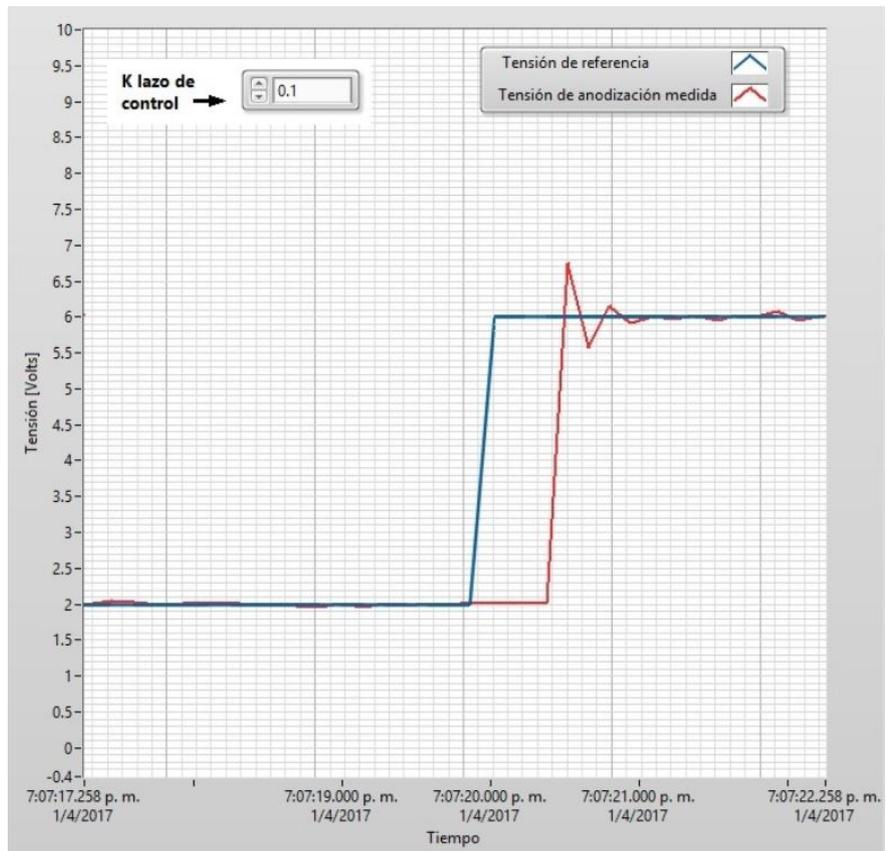


Fig. 10.9 Respuesta al escalón de tensión - step response

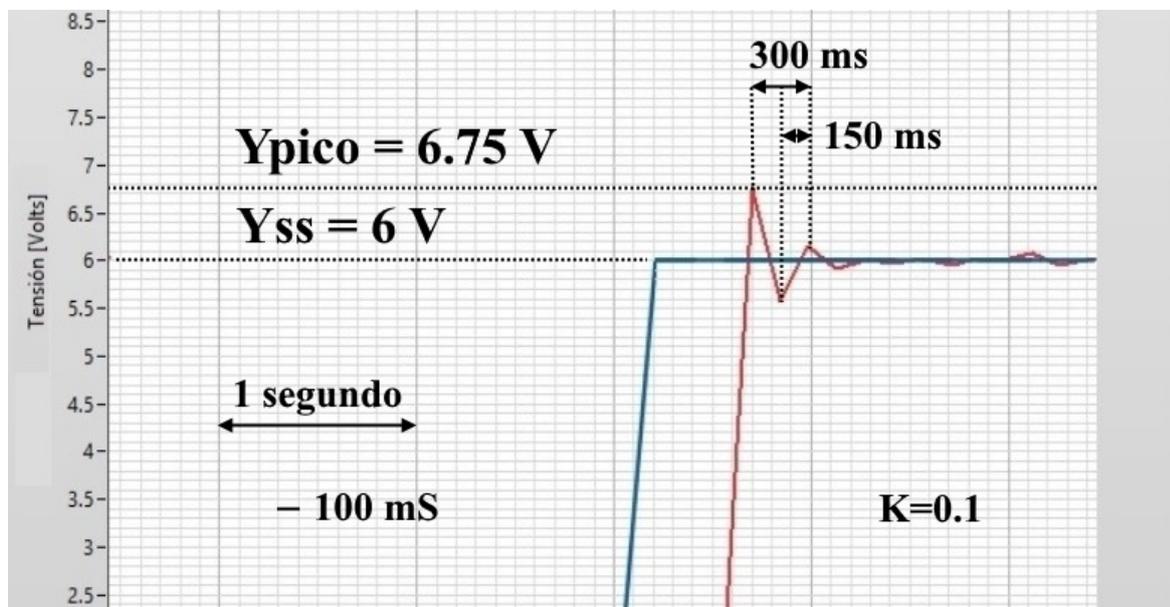


Fig. 10.10 Respuesta al escalón de tensión - *step response* (detalle)

Analizando la frecuencia de oscilaciones o *ringing*:

$$\omega_d = 2\pi f = 2\pi \frac{1}{T} \quad / \quad T = 300ms \quad \Rightarrow \quad \omega_d = 20.94 rps$$

Podemos obtener la pulsación natural de modo que:

$$\omega_n = \frac{\omega_d}{\sqrt{1-\xi^2}} = 23.725 rps$$

Recordando la ecuación general para sistemas de segundo orden:

$$TF(S)_{orden2} = \frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2}$$

Reemplazamos:

$$TF(S)_{LC} = \frac{562.87}{S^2 + 22.311S + 562.87}$$

Utilizando Matlab, podemos simular la respuesta del sistema obtenido. El resultado se aprecia en la figura 10.11:

```
TFLC=tf([562.87],[1 22.311 562.87]);
OPT=stepDataOptions('InputOffset',2,'StepAmplitude',4);
step(TFLC,OPT)
```

Podemos ver que el sistema simulado responde al análisis efectuado con datos de las pruebas. Por otro lado es necesario obtener el sistema aproximado a lazo abierto, de modo que

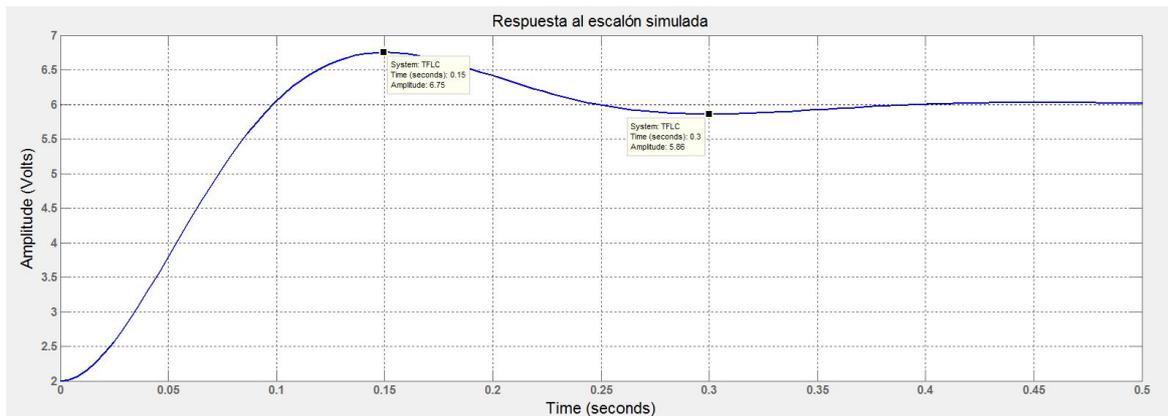


Fig. 10.11 Respuesta al escalón de tensión simulada (Matlab)

sea posible efectuar simulaciones sobre el modelo que permitan anticipar comportamientos con distintas ganancias configuradas. En primer lugar, los datos fueron tomados con una ganancia de 0.1, por lo que:

$$K_{0.1} K_s = 562.87 \quad \Rightarrow \quad K_s \approx 5629$$

La ecuación a lazo abierto genérica para este sistema es:

$$TF(S)_{LA} = \frac{K_s}{S(S + 2\xi\omega_n)} = \frac{5629}{S(S + 22.31)}$$

Podemos ejecutar el siguiente código en Matlab para obtener el lugar de raíces de esta función de transferencia, para estimar el comportamiento a lazo cerrado. (cuyo resultado se puede apreciar en la figura 10.12).

```
SLA=tf([5629],[1 22.311 0]);
rlocus(SLA)
```

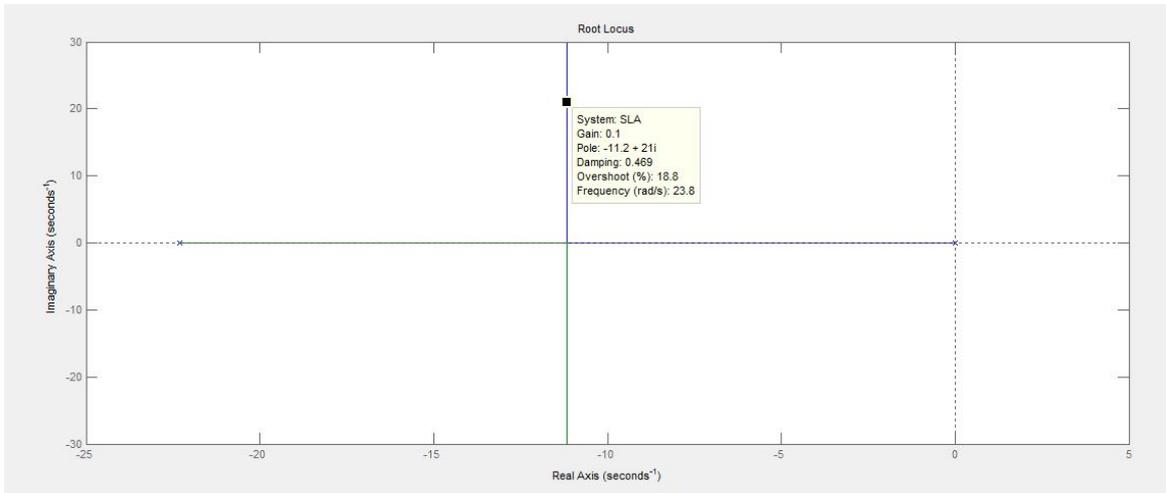


Fig. 10.12 Lugar de raíces para el sistema analizado

Se puede observar que los parámetros para una ganancia de 0.1 a lazo cerrado coinciden con los esperados. Se programa la siguiente secuencia de comandos en Matlab para simular la respuesta del sistema con distintos valores de ganancia.

```
figure ;
OPT=stepDataOptions('InputOffset',2,'StepAmplitude',4);
K=0.02;
SLA=tf([5629],[1 22.311 0])
SLC=feedback(K*SLA,1);
step(SLC,OPT,'b'); hold on;
K=K+0.02; %K = 0.04
SLC=feedback(K*SLA,1);
step(SLC,OPT,'r'); hold on;
K=K+0.02; %K = 0.06
SLC=feedback(K*SLA,1);
step(SLC,OPT,'k'); hold on;
K=K+0.02; %K = 0.08
SLC=feedback(K*SLA,1);
step(SLC,OPT,'c'); hold on;
```

```

K=K+0.02;    %K = 0.1
SLC=feedback (K*SLA, 1);
step (SLC, OPT, 'm' ); hold on;
K=K+0.02;    %K = 0.12
SLC=feedback (K*SLA, 1);
step (SLC, OPT, 'g' ); hold on;
K=K+0.02;    %K = 0.14
SLC=feedback (K*SLA, 1);
step (SLC, OPT, 'y' );

```

Los resultados obtenidos se presentan en la figura 10.13 variando la ganancia desde 0.02 hasta 0.14 en pasos de 0.2. En este punto se realiza el camino inverso, configurando distintas ganancias y evaluando si el modelo se ajusta a lo obtenido. Para ello se analizan algunas mediciones, presentadas en la figura 10.14. Se observa que los resultados se aproximan a lo esperado, por lo que el modelo resulta útil para describir el sistema. Debe notarse que en el sistema implementado, se nota un comportamiento inestable en ganancias iguales o superiores a 0.18. Es en este punto donde el comportamiento discreto del sistema cobra importancia.

Table 10.2 Referencias para la figura 10.13

Color	Ganancia	Coef. de Amort. (Cita)
Azul	0.02	1.000
Rojo	0.04	0.743
Negro	0.06	0.607
Cyan	0.08	0.525
Magenta	0.10	0.469
Verde	0.12	0.429
Amarillo	0.14	0.397

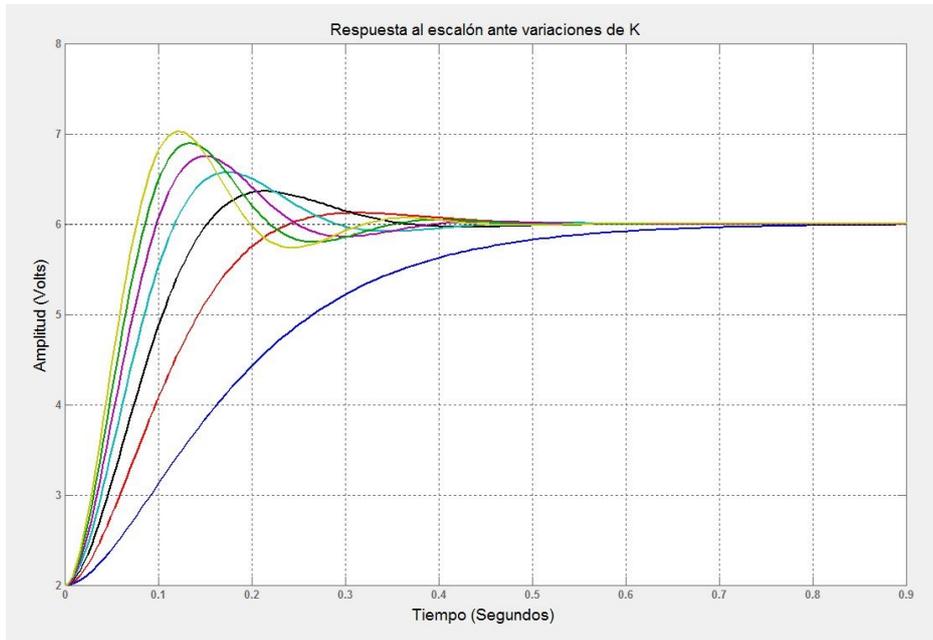


Fig. 10.13 Simulación de la respuesta del sistema ante variaciones de ganancia

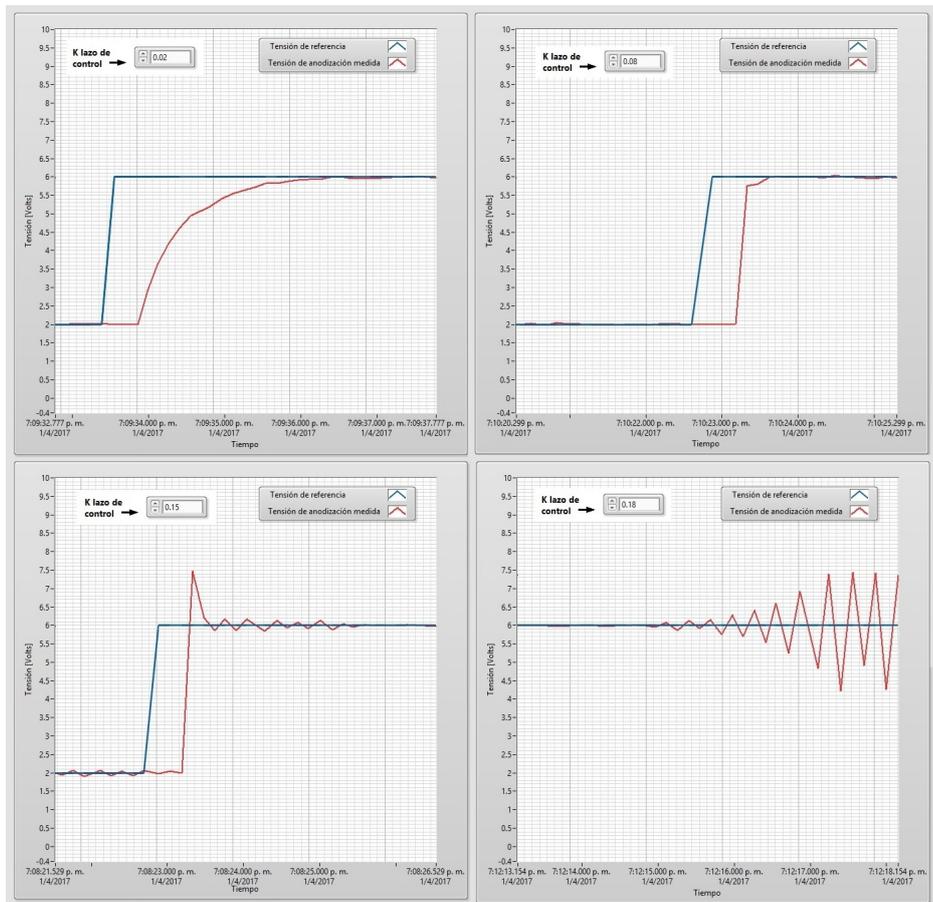


Fig. 10.14 Pruebas de la respuesta del sistema con distintas ganancias

10.2.4 Comportamiento discreto

El modelo planteado en la sección 10.2.3 es un modelo aproximado, y su principal contra es que no admite inestabilidad. Como se observa en la figura 10.12, el sistema es incondicionalmente estable. Podemos simular el sistema con una ganancia de 30 y corroborar que el único efecto es modificar las características de respuesta transitoria y aumentar el error en estado estable (10.15).

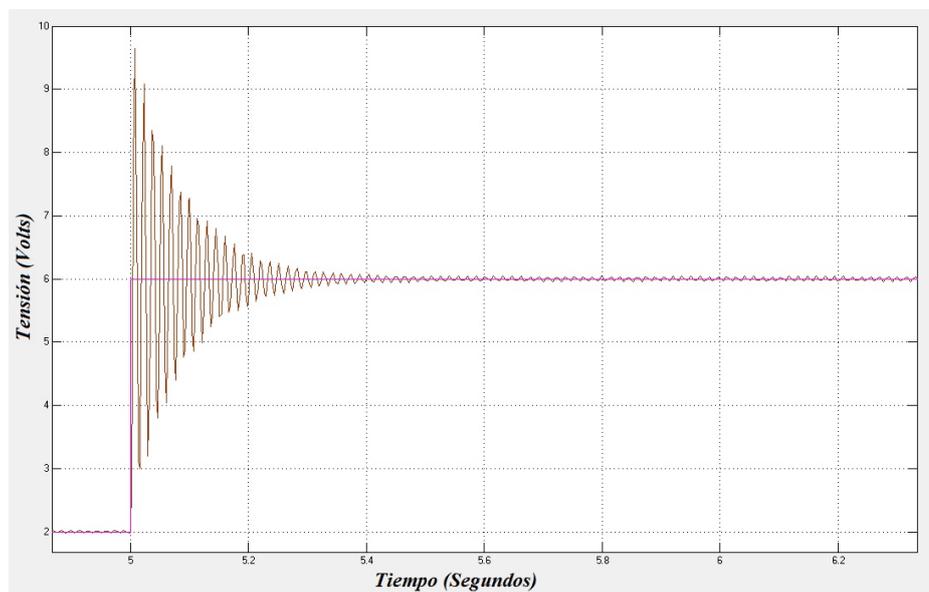


Fig. 10.15 Step response para K=30

Por ello, es de utilidad tener un modelo aproximado del sistema que tome en cuenta los efectos del muestreo. Analizando en detalle las mediciones en el sistema implementado, podemos aproximar el tiempo de muestreo a 150 ms. (Figura 10.16). Utilizando el sistema continuo a lazo abierto obtenido, se programa un *script* en Matlab para obtener el sistema en dominio Z:

```
SLA=tf([5 6 2 9],[1 22.31 0]);
```

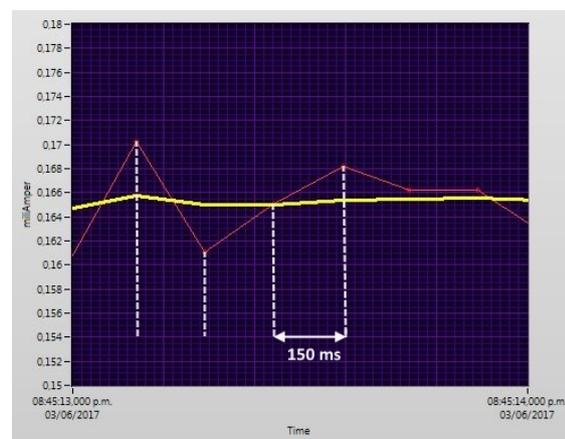


Fig. 10.16 Detalle de una señal medida, análisis de tiempo de muestreo

```
TFD = c2d(SLA,0.15,'foh')
figure;
OPT=stepDataOptions
('InputOffset',2,
'StepAmplitude',4);
step(feedback(K*TFD,1),OPT,'r');
```

Obteniendo la siguiente función de transferencia:

$$TF(Z)_{LA} = \frac{10.87Z^2 + 23.44Z + 2.196}{Z^2 - 1.035Z + 0.03521}$$

Se simula la función obtenida, con la disposición presentada en la figura 10.17.

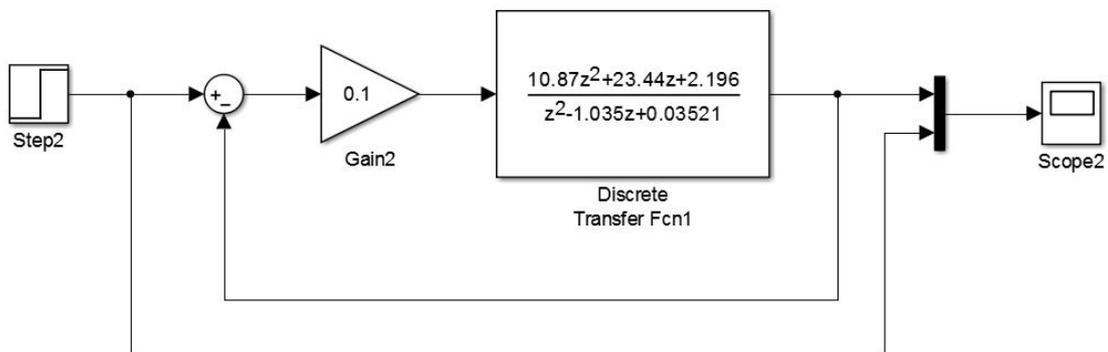
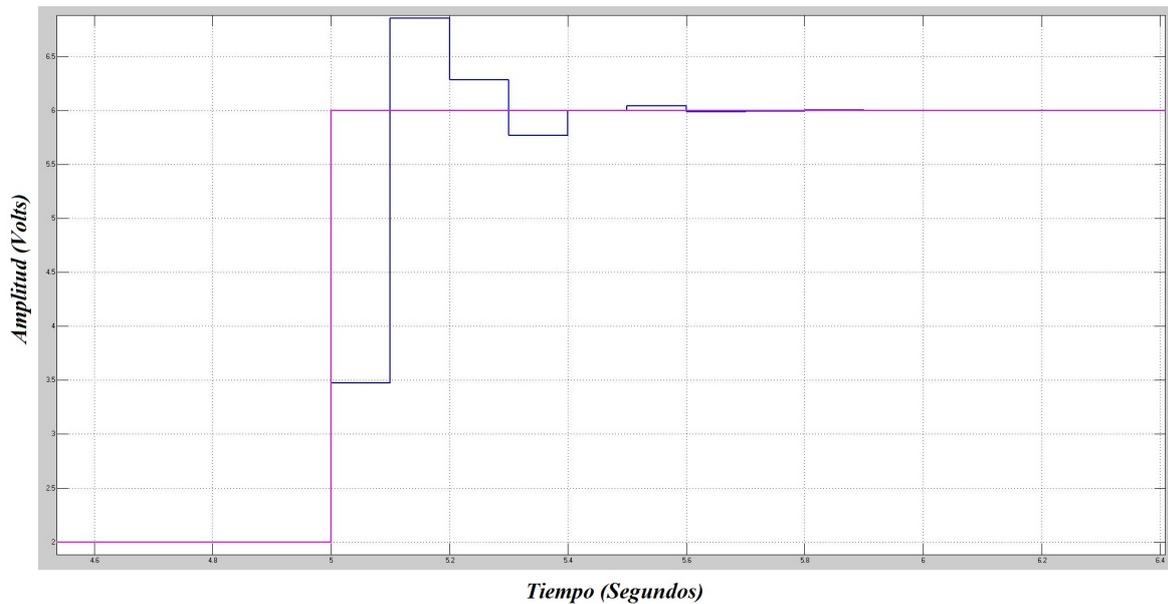


Fig. 10.17 Simulación para sistema discreto K=0.1

El resultado obtenido se puede apreciar en la figura 10.18, el cual se encuentra dentro de los parámetros esperados según las simulaciones en tiempo continuo.

Fig. 10.18 Respuesta simulada para $K=0.1$

Para evaluar el comportamiento del sistema a medida que aumenta la ganancia, manteniendo el período de muestreo, se utiliza el siguiente script en Matlab:

```
SLA=tf ([5629] ,[1 22.31 0]);
TFD = c2d(SLA,0.15 , 'foh')
figure ;
OPT=stepDataOptions ( 'InputOffset' ,2 , 'StepAmplitude' ,4);
step ( feedback (0.05*TFD,1) ,OPT, 'r' );
hold on;
step ( feedback (0.1*TFD,1) ,OPT, 'b' );
hold on;
step ( feedback (0.15*TFD,1) ,OPT, 'c' );
figure ;
rlocus (TFD)
```

En el gráfico de lugar de raíces (10.19) se puede observar que la pérdida de estabilidad sucede en ganancias cercanas a 0.2 (se excede el círculo unitario), lo cual era esperado ya

que las pruebas del sistema demostraban pérdida de estabilidad en ganancias cercanas a 0.18 y oscilaciones incontrolables en ganancias mayores.

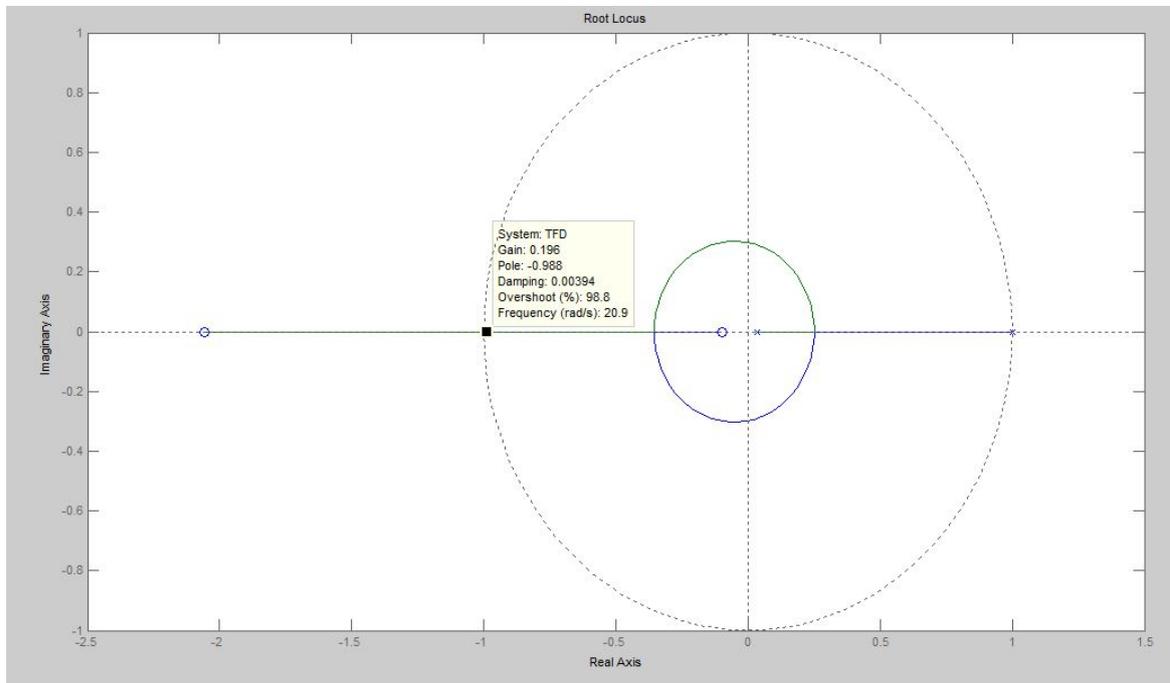


Fig. 10.19 Lugar de raíces para el sistema discreto

Esto se puede verificar observando las oscilaciones en aumento para los tres casos generados en el script, y utilizando la ganancia límite en Simulink para el caso inestable. (Figuras 10.20 y 10.21)

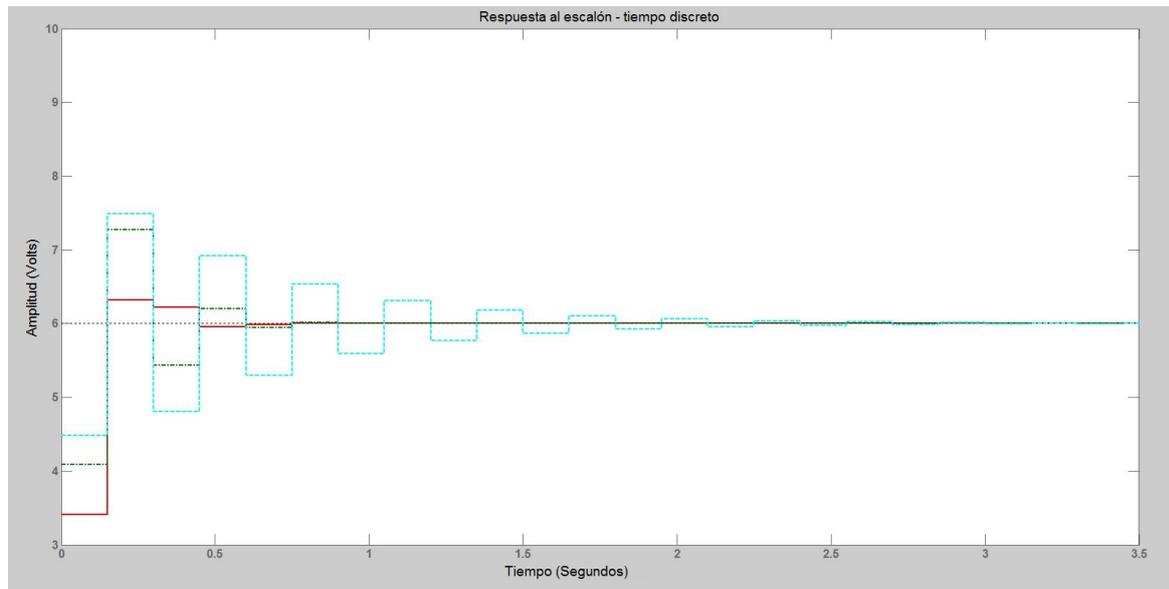


Fig. 10.20 Respuestas simuladas para $K=0.05$, $K=0.1$, $K=0.1$

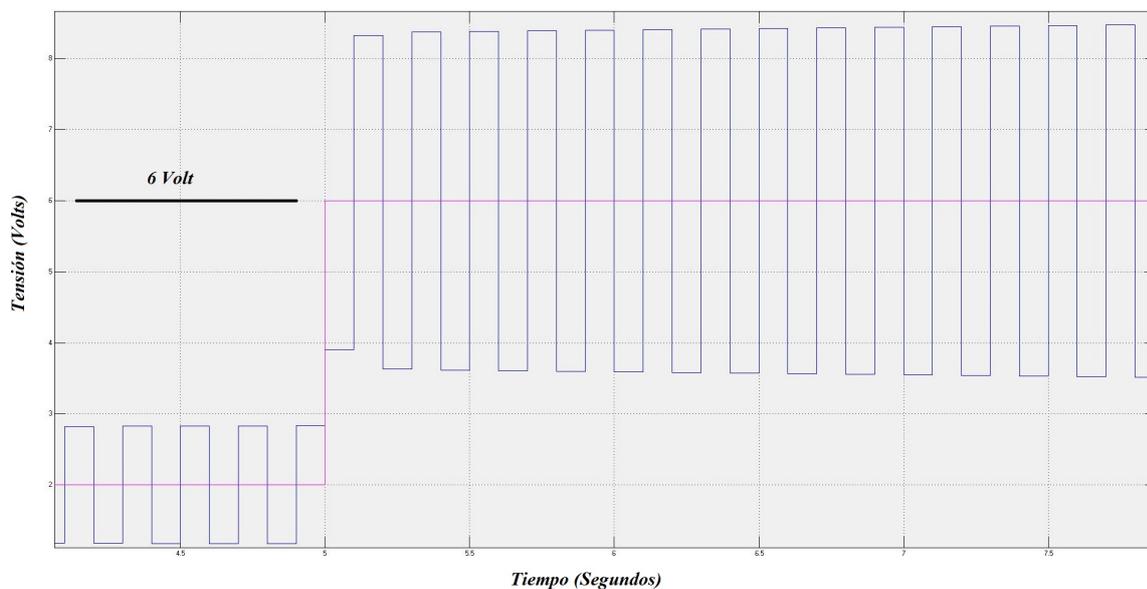


Fig. 10.21 Respuesta simulada para $K \rightarrow 0.2$ (inestabilidad)

Como se demostró, el sistema discreto propuesto propone una buena aproximación para un modelo predictor. Con esto solo se pretende brindar dos opciones de análisis, para dos niveles en el estudio de sistemas de control, abordando un análisis continuo (básico) y un análisis discreto (más avanzado) con vista en los objetivos didácticos del sistema.

10.3 Pruebas del sistema completo

En secciones anteriores se presentaron algunas pruebas de distintos módulos del sistema. En esta sección se describirán las pruebas de los sistemas restantes, las cuales fueron realizadas sobre el prototipo final tanto en software como en hardware.

10.3.1 Pruebas de toma de imágenes

Utilizando una cámara web de alta definición Logitech serie C525 (Ver figura 5.10 - derecha), se generó un timelapse de imágenes, el cual fue compilado satisfactoriamente una vez cerrado el programa. Algunos fotogramas se pueden observar en la figura 10.22.

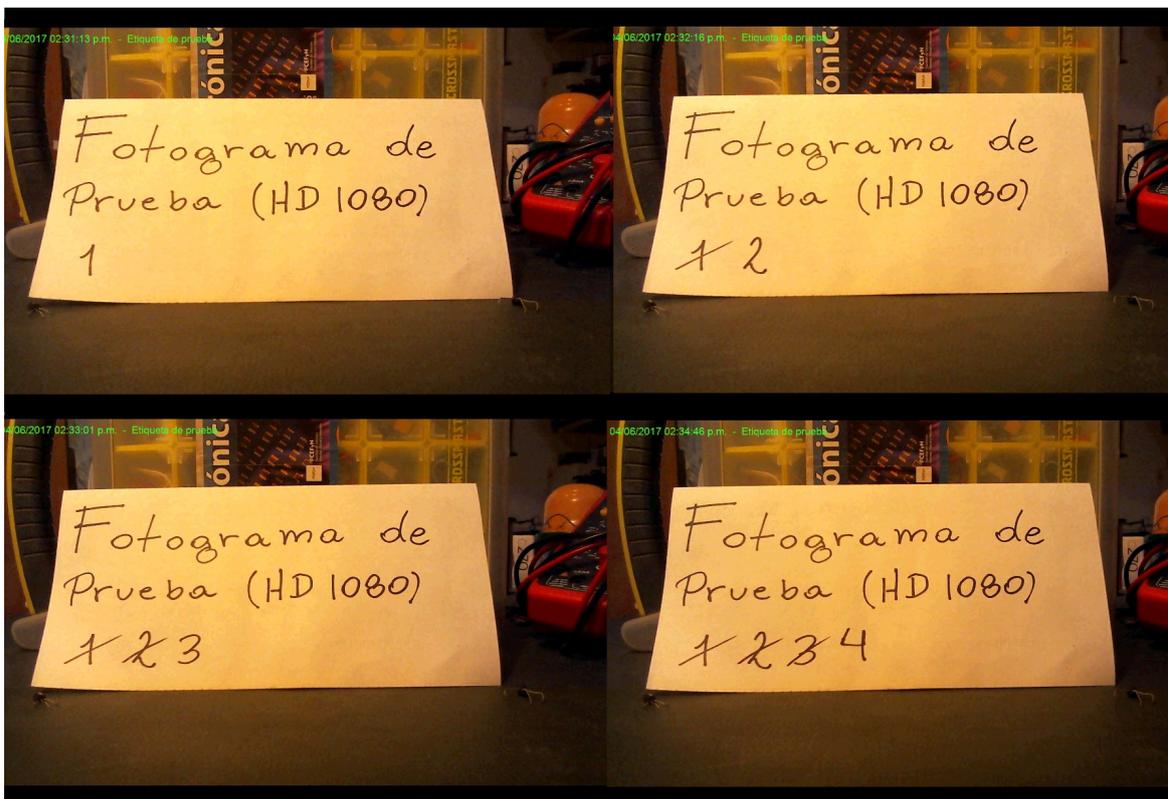


Fig. 10.22 Prueba de toma y compilado de imágenes

La etiqueta sobre el vídeo es coherente con los datos ingresados por "el usuario" y con la fecha del sistema. Se estima que la pérdida de datos medidos debido al tiempo de obturación y lectura, con este modelo de cámara, es de aproximadamente un segundo. En alta definición,

se puede esperar un peso aproximado de 10MB por segundo de duración del vídeo compilado. Se observó que el primer fotograma del vídeo, en la mayoría de los casos, es una imagen de malas características. Esto es debido a que la cámara utiliza la primer toma para calibrar valores (La mayoría de las cámaras comerciales al día de la fecha cuentan con auto-calibrado); Este fotograma es casi imperceptible en el vídeo compilado.

10.3.2 Pruebas de almacenamiento de datos en archivo de texto

En la figura 10.23 se puede observar el aspecto del archivo de texto generado con los datos. De izquierda a derecha, los datos son: Hora, Minuto y Segundo, Fecha en formato extenso, Tensión de anodización medida en Volts, Corriente de anodización medida en mA, Temperatura en grados celsius y gramos anodizados. Por último, si hubo un error en el sistema, aparecerá una etiqueta rezando "Dato no confiable".

03 05 34	5/6/2017 3:05:34 a. m.	1.991134	0.108776	20.937510	0.000007
03 05 38	5/6/2017 3:05:38 a. m.	2.035322	0.108980	20.912430	0.000011
03 05 42	5/6/2017 3:05:42 a. m.	2.028726	0.109312	20.917380	0.000016
03 05 46	5/6/2017 3:05:46 a. m.	2.020630	0.110080	20.927280	0.000021
03 05 50	5/6/2017 3:05:50 a. m.	1.996003	0.110969	20.932560	0.000025
03 05 55	5/6/2017 3:05:55 a. m.	2.058116	0.108750	20.927280	0.000030
03 05 59	5/6/2017 3:05:59 a. m.	1.978413	0.109942	20.932560	0.000035
03 06 03	5/6/2017 3:06:03 a. m.	2.032928	0.109730	20.922330	0.000039
03 06 07	5/6/2017 3:06:07 a. m.	1.996381	0.111499	20.932560	0.000044
03 06 11	5/6/2017 3:06:11 a. m.	2.022999	0.110396	20.937510	0.000049
03 06 15	5/6/2017 3:06:15 a. m.	1.986868	0.110425	20.957640	0.000053
03 06 19	5/6/2017 3:06:19 a. m.	2.017060	0.108186	20.927280	0.000058
03 06 23	5/6/2017 3:06:23 a. m.	1.999896	0.109872	20.922330	0.000063
03 06 27	5/6/2017 3:06:27 a. m.	1.978993	0.109923	20.897250	0.000067
03 06 31	5/6/2017 3:06:31 a. m.	1.964618	0.110704	20.932560	0.000072
03 06 35	5/6/2017 3:06:35 a. m.	1.995643	0.109424	20.907150	0.000077
03 06 39	5/6/2017 3:06:39 a. m.	1.967664	0.110581	20.917380	0.000081
03 06 43	5/6/2017 3:06:43 a. m.	2.016957	0.110931	20.922330	0.000086
03 06 48	5/6/2017 3:06:48 a. m.	2.028607	0.111220	20.932560	0.000091
03 06 52	5/6/2017 3:06:52 a. m.	1.997634	0.110286	20.922330	0.000095
03 06 56	5/6/2017 3:06:56 a. m.	1.999111	0.110270	20.932560	0.000100
03 07 00	5/6/2017 3:07:00 a. m.	2.009725	0.109816	20.942460	0.000105
03 07 04	5/6/2017 3:07:04 a. m.	2.021994	0.110678	20.917380	0.000109
03 07 08	5/6/2017 3:07:08 a. m.	2.039481	0.110201	20.942460	0.000114
03 07 12	5/6/2017 3:07:12 a. m.	1.994437	0.110689	20.932560	0.000119
03 07 16	5/6/2017 3:07:16 a. m.	2.027041	0.108871	20.917380	0.000123
03 07 20	5/6/2017 3:07:20 a. m.	1.997532	0.110050	20.907150	0.000128
03 07 24	5/6/2017 3:07:24 a. m.	2.003198	0.110210	20.907150	0.000133
03 07 29	5/6/2017 3:07:29 a. m.	1.997954	0.111165	20.912430	0.000137
03 07 33	5/6/2017 3:07:33 a. m.	2.060113	0.109883	20.907150	0.000142
03 07 37	5/6/2017 3:07:37 a. m.	1.997107	0.111069	20.947740	0.000147
03 07 41	5/6/2017 3:07:41 a. m.	2.020685	0.109956	20.927280	0.000152
03 07 45	5/6/2017 3:07:45 a. m.	1.965297	0.111497	20.937510	0.000156
03 07 49	5/6/2017 3:07:49 a. m.	1.981881	0.110261	20.887020	0.000161
03 07 53	5/6/2017 3:07:53 a. m.	2.012026	0.111602	20.932560	0.000166

Fig. 10.23 Prueba de almacenamiento de datos en archivo de texto

La escritura del archivo de texto es mediante una función "Append", por lo que cualquier dato de sesiones anteriores quedará almacenado a no ser que el usuario lo elimine manualmente desde un editor de texto ASCII.

10.3.3 Transmisión y recepción de datos mediante Bluetooth

Utilizando los comandos definidos en la tabla 5.1 del capítulo 5, se prueba las interfaces con un dispositivo bluetooth USB en una computadora por un lado, y con un *smartphone* por otro.

Comunicación por computadora

En la figura 10.24 se pueden observar los resultados de una prueba realizada con el hardware "Hércules"¹. Los comandos enviados al sistema embebido se aprecian encuadrados en rojo (texto magenta). La respuesta del sistema embebido se aprecia encuadrada en color verde (texto negro). Los resultados fueron satisfactorios, todos los comandos configuran o devuelven la información correspondiente.

Comunicación por smartphone

En las figuras 10.25 y 10.26 se pueden observar los resultados de una prueba realizada con un smartphone, utilizando la aplicación "Bluetooth terminal"² disponible de forma gratuita en Google PlayStore³. De forma similar al apartado anterior, se indican los comandos enviados y la respuesta del sistema embebido. Los resultados fueron satisfactorios, todos los comandos configuran o devuelven la información correspondiente.

¹http://www.hw-group.com/products/hercules/index_en.html

²<https://play.google.com/store/apps/details?id=project.bluetoothterminal>

³<https://play.google.com/store>

UDP Setup	Serial	TCP Client	TCP Server	UDP	Test Mode	About
-----------	--------	------------	------------	-----	-----------	-------

Received/Sent data

```

Serial port COM4 opened
m0.003449
d0.000046
t0.065126
e0.158007
H20170501091300Z-3.0-31.4-64.5?z Zona horaria configurada:
-3.000000
Longitud configurada: -31.400000
Latitud configurada: -64.500000
?d Tension en la resistencia calibrada : 0.011733
Senal de error para el sistema de control : 0.000000
Senal de control medida: 0.000101
Tension de control utilizada: 0.000000
Tension de referencia establecida: 0.000000
Tension de anodizacion medida: 0.518906
?a Parametros del servomotor : 30
0.833333
?s Datos cargados para calcular la posicion solar:
Ano: 2017
Mes: 5
Dia: 1
Hora: 9
Minuto: 13
Segundo: 0
?f Datos del tiempo en el microcontrolador (tiempo real):
Ano: 2017
Mes: 5
Dia: 1
Hora: 9
Minuto: 14
Segundo: 0
Serial port COM4 closed

```

Fig. 10.24 Prueba de transmisión/recepción de datos en PC

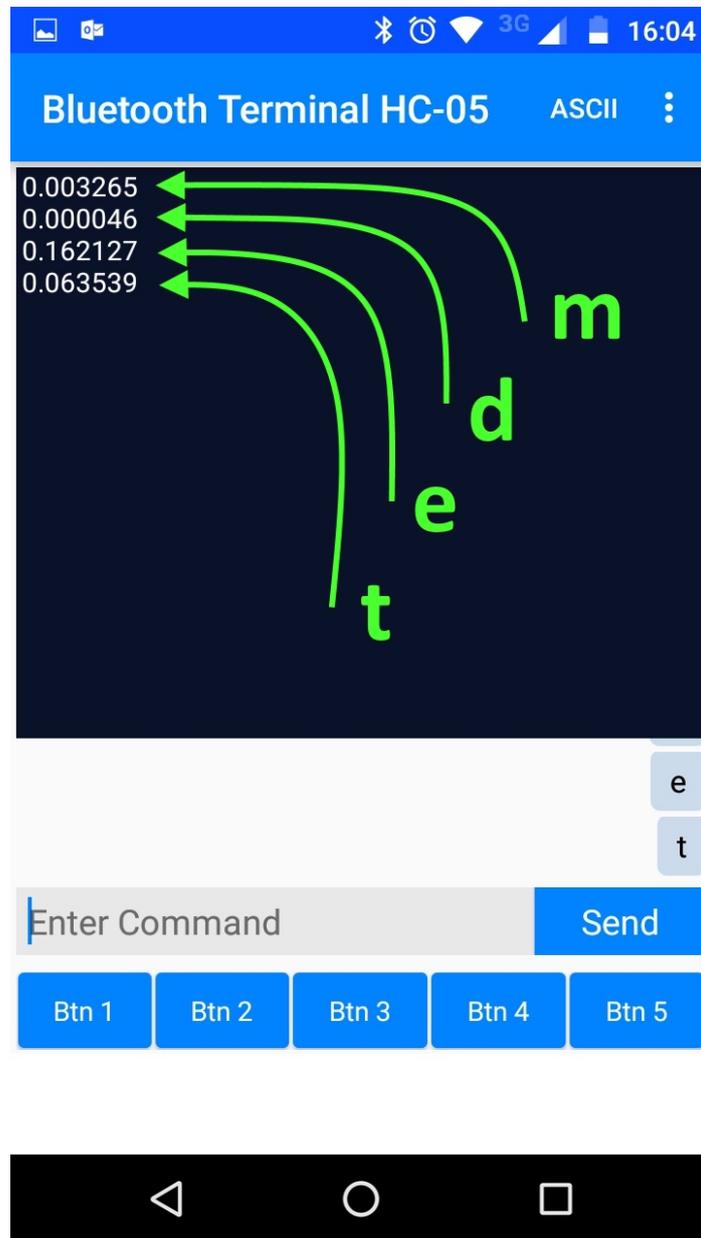


Fig. 10.25 Prueba de transmisión/recepción de datos en smartphone (1)



Fig. 10.26 Prueba de transmisión/recepción de datos en smartphone (2)

10.3.4 Instrumentación virtual - impedancia variable

Distintas pruebas de la interface de instrumentación virtual se pueden observar en el presente capítulo, así como también en el capítulo 8. Con el objetivo de probar la estabilidad y respuesta del sistema, se tomaron muestras con una impedancia variable y una ganancia de lazo de control de 0.1. La impedancia en cuestión representa el medio (la solución en el recipiente). El resultado de la prueba se puede apreciar en la figura 10.27.

10.3.5 Instrumentación virtual - ejecución completa

Por las características del proyecto desarrollado y a que el uso del mismo es interactivo, la mejor forma de presentar el sistema funcionando completamente es mediante filmaciones, las cuales se encuentran en el DVD adjunto al presente proyecto, en la carpeta "VIDEOS". En la figura 10.28 se puede apreciar el *log* de una ejecución normal, donde los parámetros se configuran correctamente y se indica que no hubo errores. Es imposible, por el diseño del

programa, que se indique al usuario que el sistema esta listo para medir si no están dadas todas las condiciones para ello.

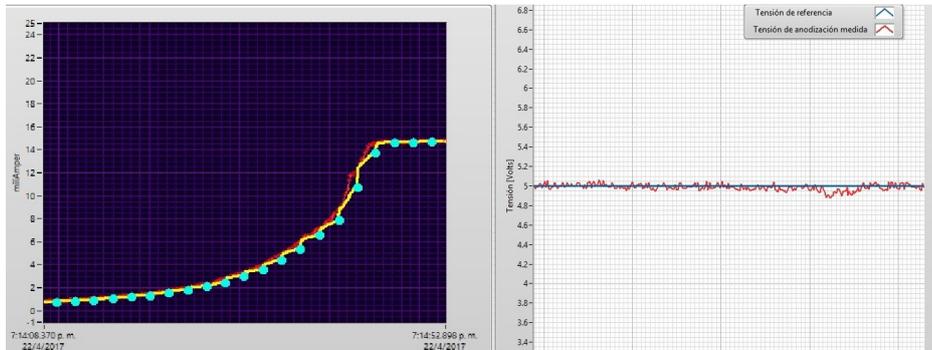


Fig. 10.27 Prueba de instrumentación virtual, a impedancia variable

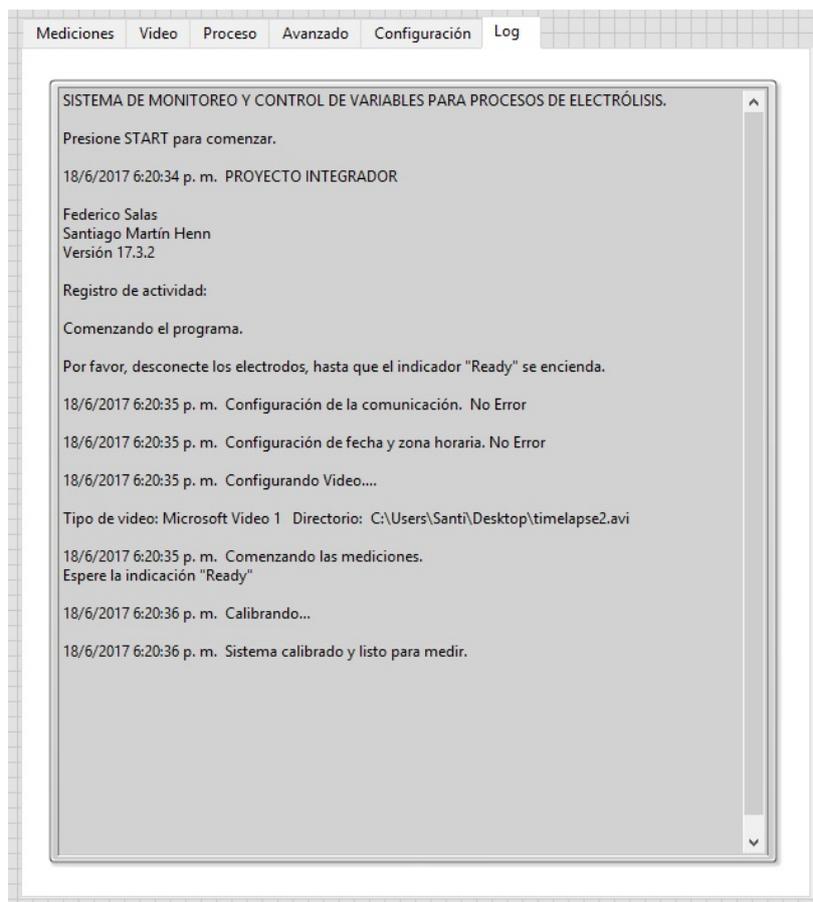


Fig. 10.28 Log de una ejecución normal

10.3.6 Resultados de pruebas con agua corriente

Se realizaron varias pruebas con electrodos de distinto tipo. Los mejores resultados se obtuvieron con electrodos de aluminio. Los videos e imágenes correspondientes a estas pruebas se pueden hallar en el DVD adjunto en la carpeta VIDEOS. En las figuras 10.29 y 10.30 se puede observar rasgos que sin lugar a duda caracterizan un proceso electroquímico.



Fig. 10.29 Etapas de la electrocoagulación



Fig. 10.30 Apariencia de los electrodos luego de dos horas de proceso

CAPÍTULO 11

Instrucciones de uso

En este capítulo se describe el procedimiento para el uso correcto del sistema. Se pueden consultar los videos en el DVD adjunto al presente informe, en los cuales se puede observar los pasos para el uso con instrumental virtual.

11.1 Disposición del dispositivo y consideraciones preliminares

11.1.1 Montura guiada para el panel solar

El elemento más crítico en cuanto a la ubicación es la montura del panel solar, sin embargo la instalación del mismo es simple. Se debe ajustar el ángulo principal con el mismo valor de la latitud del lugar de instalación (por ejemplo: en la ciudad de Córdoba, Argentina, la latitud es de -31.4 , por lo que el ángulo debiera ser de 31° o 32°). Con ayuda de una brújula o una referencia visual, se debe ubicar la montura de modo que el eje de rotación del panel apunte hacia el Sur, en su parte más elevada.

11.1.2 Bluetooth

El dispositivo bluetooth debe estar apareado con el dispositivo de control, para el hardware implementado el código de apareamiento es "1234".

11.2 Uso mediante instrumentación virtual

Esta sección describe las instrucciones de instalación y configuración. El sistema se ha probado en plataformas Windows y Android, pero softwares similares permiten la utilización en otros sistemas operativos.

11.2.1 Instalación

Para utilizar el sistema por computadora, se debe contar con el instalador correspondiente (Adjunto en el DVD que acompaña este informe). Ejecutando el archivo "Setup.exe" el instalador guiará al usuario con los pasos necesarios. Si el usuario no cuenta con los entornos de ejecución de National Instruments, los mismos se instalarán automáticamente (Lo que puede prolongar el tiempo de instalación). Al finalizar la instalación el usuario contará con un acceso directo en el escritorio, de color violeta ¹.

11.2.2 Configuración

Antes de comenzar a utilizar el programa, el usuario debe configurar el mismo siguiendo estos pasos. En la pestaña configuración de la interfaz de usuario:

1. Seleccionar el puerto del dispositivo bluetooth. (Este dato se puede consultar en el administrador de dispositivos del sistema operativo.)
2. Colocar los datos referentes al lugar de instalación del sistema: Zona horaria, Latitud y Longitud ².

¹ Al ejecutar el programa, el sistema le puede requerir permisos de administrador.

² Si no se pretende utilizar el sistema de alimentación solar con seguimiento, este dato se puede ignorar

3. **Solo si se modificó el hardware.** Seleccionar el valor de la resistencia calibrada y el valor de referencia para el conversor ADC.
4. Seleccionar el tiempo de promedio para las mediciones de corriente. Recordar que este también es el intervalo de almacenamiento de datos (Tanto en la tarjeta de memoria, como en el archivo de salida en la computadora).
5. Seleccionar el intervalo entre fotografías (las cuales conformarán el vídeo de salida a una tasa de 24 fotografías por segundo), el origen de la etiqueta de texto en el vídeo, la cámara web deseada para tomar las fotos (Si hay mas de una presente en el sistema) y el directorio del archivo donde se almacenarán los datos (El archivo debe existir).
6. ***Solo para usuarios avanzados:*** Seleccionar las rutinas de *debug* deseadas.

En la pestaña Vídeo:

1. Seleccionar el directorio de salida para el vídeo, especificando el nombre de archivo de salida, acompañado de la indicación de formato ".avi".
2. Seleccionar si se quiere o insertar la etiqueta de texto en el vídeo.

En la pestaña Avanzado:

- **Solo usuarios avanzados.** Determinar el valor de K para el lazo de control. **Este valor no debe superar 0.12.**

11.2.3 Utilización

Para comenzar las mediciones, se debe seguir estos pasos:

1. Comprobar que la llave derecha que abre el circuito de los electrodos este en posición "apagada" (La luz indicadora se encuentra apagada).
2. Configurar la tensión de anodización en 0. Configurar los valores de la pestaña "Proceso"

3. Presionar START en la interfaz de usuario, y esperar la indicación Ready. (Las mediciones comenzarán automáticamente en este momento, debiendo indicar corriente cero o muy aproximada a cero)
4. Una vez el indicador Ready se encienda, conmutar la llave del punto 1 cerrando el circuito de los electrodos.
5. Configurar la tensión de anodización deseada.

Nota: si la corriente medida cuando el dispositivo indica un valor positivo en "Ready" no es cero -usualmente en estos casos, se indican valores negativos-, repetir los pasos desconectando el conector banana negro ubicado en el gabinete y activando la llave derecha del ítem 1 (De modo que no existan tensiones almacenadas de sesiones anteriores que puedan afectar las mediciones de offset). Este borne también puede ser usado en caso de emergencia para abrir rápidamente el circuito.

11.3 Uso mediante *smartphone*

Se puede utilizar el sistema con cualquier dispositivo Android que cuente con bluetooth.

11.3.1 Instalación

Se debe descargar la aplicación *Bluetooth Terminal* en el dispositivo inteligente. Siguiendo los pasos de instalación, la aplicación debería estar lista para funcionar en un momento. Antes de ejecutarla, se debe aparear el dispositivo bluetooth.

11.3.2 Configuración

Antes de comenzar a utilizar el programa, el usuario debe configurar el mismo siguiendo estos pasos.

1. Enviar mediante la consola de comandos, la fecha actual en formato HAAAAMMD-DHHMMSS (carácter 'H' seguido de año, mes, día, hora, minuto y segundo)

2. Enviar mediante la consola de comandos, los datos del lugar de instalación del sistema, en formato ZZHLATLONG (carácter 'Z' seguido de la zona horaria con dos cifras significativas, la latitud con signo y 3 cifras significativas, la longitud con signo y 3 cifras significativas).
3. Determinar la tensión de anodización enviando un carácter V seguido de la tensión de anodización, con 3 cifras significativas (ej: V4.55).
4. Ejecutar la acción de control enviando K0.05 (carácter 'K' seguido de el valor de ganancia, modificar el valor 0.05 solo si es un usuario avanzado) hasta que la tensión de en los electrodos sea la deseada (puede consultar esto enviando el carácter 'e').

11.3.3 Utilización

La utilización mediante Smartphone esta prevista, en parte, como mejora a futuro, utilizando una aplicación especifica, pero es posible tomar los datos críticos del sistema mediante el comando '?D' o cualquier otro comando de los disponibles. Se puede obtener un resumen de la tensión de control, la tensión de anodización, y la corriente que circula en la solución, de modo que se pueden realizar todas las mediciones necesarias para realizar un análisis electroquímico. A diferencia de la interfaz de instrumentación virtual, la toma de datos es mediante consulta y se deben registrar a mano en una planilla de calculo. Otras consideraciones de uso, son similares a lo explicado en el uso mediante instrumentación virtual.

CAPÍTULO 12

Conclusiones

12.1 Resultados obtenidos en base a los objetivos propuestos

Considerando las características propias del sistema construido para este proyecto integrador y estableciendo una comparativa con los objetivos técnicos y didácticos propuestos al inicio del desarrollo (y en la solicitud presentada a la cátedra de proyecto integrador) se elaboran las siguientes conclusiones:

- Se pudo desarrollar un sistema que permite realizar el proceso electro-químico conocido como Electrocoagulación. El dispositivo diseñado no posee una gran capacidad volumétrica para el tratamiento de líquidos (2.7[L]), sin embargo para fines prácticos la capacidad existente se considera suficiente para realizar pruebas de campo o de laboratorio. Por otro lado, si bien el rango de valores posibles de d.d.p. existente entre electrodos es pequeño (1-8[V] en la configuración del prototipo), la investigación realizada en referencia al proceso electro-químico necesario para la separación de metales pesados en líquidos permite afirmar que es posible alcanzar el objetivo correspondiente, teniendo en cuenta la conductividad del medio y diseñando el tamaño de los electrodos acorde a ello.

- A través de la aplicación de los conocimientos adquiridos durante el cursado de la carrera, precisamente las áreas de electrónica digital, síntesis de redes activas y electrónica analógica, junto con la utilización de software de instrumentación virtual, se consiguió un sistema que permite medir con gran velocidad y precisión todas las variables intervinientes en el proceso, almacenando todos los datos adquiridos en diversos dispositivos para un análisis posterior mas detallado.
- La medición de las variables intervinientes en el sistema es un proceso importante, y uno de los datos medidos (la tensión entre electrodos) es utilizado para establecer un lazo de control. Para poder realizar este sistema, fueron fundamentales los conceptos presentes en las asignaturas relacionadas a sistemas de control. Realizando gran cantidad de pruebas es posible afirmar que el objetivo de controlar la tensión entre electrodos se logró con excelentes resultados, permitiendo además al usuario modificar los valores de referencia y ganancia, cumpliendo objetivos técnicos y didácticos.
- A través del modelado matemático, simulaciones, y un proceso exhaustivo de pruebas pudieron encontrarse los límites de estabilidad y los errores del sistema. Los rangos de funcionamiento del sistema no impiden en lo absoluto el correcto funcionamiento del mismo según los objetivos establecidos al iniciar el proyecto.
- Otro de los objetivos propuestos inicialmente consistió en la posibilidad de tomar muestras en el seno de la solución para un posible análisis en laboratorio del líquido. Aunque desde el principio el objetivo propuesto fue tenido en cuenta a la hora de diseñar el prototipo de celda electrolítica, los conocimientos adquiridos durante el desarrollo y las sugerencias de especialistas en el tema llevaron a un re-diseño del prototipo mejorando el sistema de toma de muestras (prototipos anteriores se pueden observar en los informes de avance mensuales, anexos a este informe).
- Uno de los primeros objetivos establecidos al inicio del proyecto consistió en lograr una interfaz de usuario sencilla y fácil de comprender, que permita realizar el control del proceso, además de monitorear y almacenar en datos en tiempo real. El objetivo mencionado pudo ser conseguido gracias a la utilización de software de instrumentación

virtual. Se considera que la interfaz de usuario desarrollada puede ser fácilmente comprendida por un usuario que intervenga por primera vez con el sistema, lo cual es fundamental para cualquier desarrollo de ingeniería que pueda ser utilizado por personas no idóneas en la temática (como estudiantes o personal no capacitado).

- Para poder cumplir el objetivo de almacenar datos para su futuro análisis, se utilizaron distintos medios de almacenamiento. Por un lado el sistema de instrumentación virtual, en un plano secundario, almacena todos los datos que va adquiriendo durante el proceso en la computadora donde se encuentra instalado el software, pero además es posible almacenar los datos en una memoria volátil de tipo flash en un módulo conectado al sistema embebido, cumpliendo por dos caminos distintos el objetivo propuesto.

12.2 Conclusión general

En una era donde la electrónica es de bajo costo y fácil acceso, la automatización y la eficiencia están cada vez más al alcance para dispositivos de uso cotidiano. Es posible adquirir sistemas embebidos de una capacidad asombrosa por muy bajo costo y la capacidad que poseen para ser manejados a muy alto nivel representa la oportunidad de desarrollar sistemas de elevada complejidad en un lapso corto de tiempo, más aún considerando que este tipo de herramientas están al alcance de todos y no de una élite de profesionales con años de experiencia y capacitación. La modularización y abstracción fueron paradigmas claves para este desarrollo y esta es una predisposición tanto en la ingeniería electrónica, como en aquellas disciplinas afines. Por todo lo aquí planteado podemos decir que las herramientas que están disponibles hoy en día, de las que nos valimos en el desarrollo de este proyecto, están permitiendo no solo atacar problemas complejos de forma más eficiente si no también facilitar la interconectividad y reinención de sistemas que se creían en el estado del arte, además de la continua y fácil actualización y uso de nuevos sistemas desarrollados.

12.3 Aporte al campo de la ingeniería

Este proyecto integrador realiza aportes a la ingeniería en las áreas de desarrollo tecnológico de influencia medioambiental, social y didáctica, además de integrar conocimientos y herramientas propios de los paradigmas de la electrónica de hoy en día.

Utilizando un micro-controlador como "cerebro" del sistema y aplicando conceptos de sistemas de control enlazados con un software de instrumentación virtual, uno de los mayores aportes realizado por el proyecto es su uso didáctico a la hora de explicar conceptos de sistemas de control e interfaces de monitoreo de variables, como así también algunos conceptos demostrables relacionados a la Química.

Por otro lado se diseñó un sistema de energía solar independiente de sensores o GPS, que requiere una mínima configuración por parte del usuario. Este sistema es aproximadamente un 30% más eficiente que los sistemas fijos convencionales.

Además, se sientan las bases para resolver una problemática ambiental de extrema gravedad en el planeta, mediante herramientas electrónicas tanto para el uso como para la validación de conceptos de la electro-química.

12.4 Mejoras a futuro

Todo diseño en ingeniería esta sujeto a modificaciones que impliquen una mejora del dispositivo. Como se planteó en la conclusión general, la posibilidad de mejora se tuvo en cuenta desde un principio, y los paradigmas que guiaron el desarrollo deberían facilitar cualquier mejora o uso alternativo que se quiera dar al sistema desarrollado o las módulos que lo componen. Se dedica esta sección a plantear las mejoras que pudieran o no ser aplicadas a este proyecto integrador por un equipo de trabajo interesado en el tema aquí tratado.

- Al momento de diagramar el proyecto, se propuso la comunicación del sistema con diversos dispositivos, entre ellos un "smartphone". Si bien la comunicación indicada puede ser establecida a través de la utilización de aplicaciones estándares de vinculación bluetooth como se demuestra en este informe, una de las mejoras que se proponen para

el sistema es el desarrollo de una aplicación específica para el mismo. Se sugiere que la aplicación a ser desarrollada sea lo mas parecida posible al sistema de instrumentación virtual existente para que el usuario que la vaya a utilizar se adapte rápidamente a la misma. Por las características existentes del sistema se podría considerar que el diseño de la aplicación mencionada no debería presentar grandes dificultades a quien la desarrolle.

- Otra mejora que pudiera ser desarrollada es la aplicación efectiva del sistema de alimentación alternativa comenzado a desarrollar en este proyecto, utilizando un sistema automático de carga para baterías de litio. Si bien el seguimiento solar se consiguió satisfactoriamente, quedan pendientes las pruebas del sistema alimentándose a través de una celda fotovoltaica.
- Una posible mejora del sistema, consiste en la instalación de un sistema automatizado a través de electro válvula, que permita el control de afluentes y efluentes del recipiente, así como el control de escape ante aumentos de presión en el mismo.
- Estudiar las posibilidades del sistema para su posible aplicación en el proceso de separación molecular del agua con el objetivo de obtener y almacenar de manera segura Hidrógeno y Oxígeno, elementos combustibles que podrían ser aplicados como fuente de energía.
- El objetivo principal del sistema desarrollado implica el filtrado de líquidos, mas precisamente la separación de metales pesados de los mismos. Se podría considerar el agregado de un sistema de calentamiento que lleve al líquido al punto de hervor lo que implica la eliminación de gran cantidad de contaminantes microbiológicos que pudieran no ser afectados por el proceso de Electrocoagulación.
- Compilar y probar el sistema de instrumentación virtual en plataformas LINUX e IOS.

Bibliografía

- [1] Anant Agarawal, J. H. L. (2010). *Foundations of AD Circuits*.
- [2] Chen, C.-T. (1993). *Analog and Digital. Control System Design*. Saunders College Publishing.
- [3] Custodio, E. (2014). *Trends in groundwater pollution: Loss of groundwater quality and related services*. Groundwater Governance.
- [4] Franklin, Gene. Powell, D. E.-N. A. (1991). *Control de Sistemas Dinámicos con Retroalimentación*.
- [5] IONPURE (2016). Continuous deionization (cedi) products from ionpure.
- [6] Mohammad Y.A. Mollaha, Paul Morkovskyb, J. A. G. M. K. J. P. D. L. C. (2014). *Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation*. Journal of Hazardous Materials B114.
- [7] Ogata, K. (1998). *Ingeniería de control moderna*. Prentice-Hall hispanoamericana, S.A.
- [8] Puliafito, Allende, P. (2013). *CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA E HÍDRICA EN ARGENTINA, TOMO II*. UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL.
- [9] Robert Martin, Al Fry, E. H. M. M. (2006). Water facts and trends. *WBCSD Water and Sustainable Development Program*.
- [10] Roxanne Johnson, Tom Scherer, P. (2013). It's all in your water. *NDSU*.
- [11] Ruiz, A. A. (2005). *La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales*.
- [12] Smith, C. A. C. (1998). *Control Automático de Procesos. Teoría y Práctica*. Limusa Noriega Editores.
- [13] Svoboda, R. D. J. (2010). *Circuitos Electrónicos*. AlfaOmega.
- [14] Yousuf, Mollah, R. S. J. R. P. D. L. C. (2001). Electrocoagulation (ec) — science and applications. *Journal of Hazardous Materials.*, 84(4):29–41.
Anexo

Referencias

- <https://www.mbed.com/> - Consultada en Noviembre de 2016
- <https://developer.mbed.org/compiler/> - Consultada en Noviembre de 2016
- Charles A. Harper; Edward M. Petrie (10 de octubre de 2003). *Plastics Materials and Processes: A Concise Encyclopedia*. John Wiley and Sons. p. 9. ISBN 978-0-471-45920-0.
- Science of Silicone Polymers (Silicone Science On-line, Centre Européen des Silicones – CES)
- *Plastics Materials and Processes: A Concise Encyclopedia*. John Wiley and Sons. p. 9. ISBN 978-0-471-45920-0.
- <http://www.analog.com/en/products/amplifiers/instrumentation-amplifiers/ad627> - Consultada en Noviembre de 2016
- <http://www.sketchup.com/es> - Consultada en Noviembre de 2016
- http://www.rpi.edu/dept/arc/training/latex/LaTeX_symbols.pdf - Consultada en Marzo de 2017
- http://www.hw-group.com/products/hercules/index_en.html - Consultada en Diciembre de 2016
- <https://play.google.com/store/apps/details?id=project.bluetoothterminal> - Consultada en Diciembre de 2016

- <https://play.google.com/store> - Consultada en Diciembre de 2016
- https://www.unicef.org/spanish/wash/index_31600.html - Consultada en Enero de 2017
- <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs391/es/> - Consultada en Enero de 2017
- https://www.unicef.org/spanish/wash/water_quality.html - Consultada en Enero de 2017
- <http://www.ecoticias.com/medio-ambiente/111605/10-paises-agua-contaminada-mundo> - Consultada en Enero de 2017
- <http://aargentinapciencias.org/2/index.php/grandes-temas-ambientales/agua-y-ambiente/107-contaminacion-del-agua/159-la-contaminacion-por-metales> - Consultada en Enero 2017
- <http://www.eco-sitio.com.ar/node/1000> - Consultada en Enero de 2017
- <http://www.greenpeace.org/argentina/es/campanas/contaminacion/agua/argentina-fuentes-de-contamin/> - Consultada en Enero de 2017
- http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1817-74332009000100013 - Consultada en Enero de 2017
- <https://es.slideshare.net/brianlbg2/intoxicacion-por-metales-pesados-mercurio-plomo-arsenico-etc> - Consultada en Enero de 2017
- <http://www.facsa.com/el-agua/calidad/Metales%20pesados#.WSC-1Uc2vIU> - Consultada en Enero de 2017
- <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs372/es/> - Consultada en Enero de 2017
- https://www.atsdr.cdc.gov/es/csem/arsenic/que_es_el.html - Consultada en Enero de 2017
- <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/as.htm> - Consultada en Enero de 2017

- <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/as.htm> - Consultada en Mayo de 2017
- <http://panamahitek.com/como-funciona-el-protocolo-spi/> - Consultada en Abril de 2017
- <https://www.textoscientificos.com/energia/celulas> - Consultada en Junio de 2017
- <http://www.angelfire.com/electronic2/electronicaanalogica/celda.html> - Consultada en Junio de 2017
- <https://www.arrow.com/> - Consultada en Junio 2017
- <http://tienda.electrocomponentes.com/> - Consultada en Junio 2017

Anexo 1: Circuito final implementado

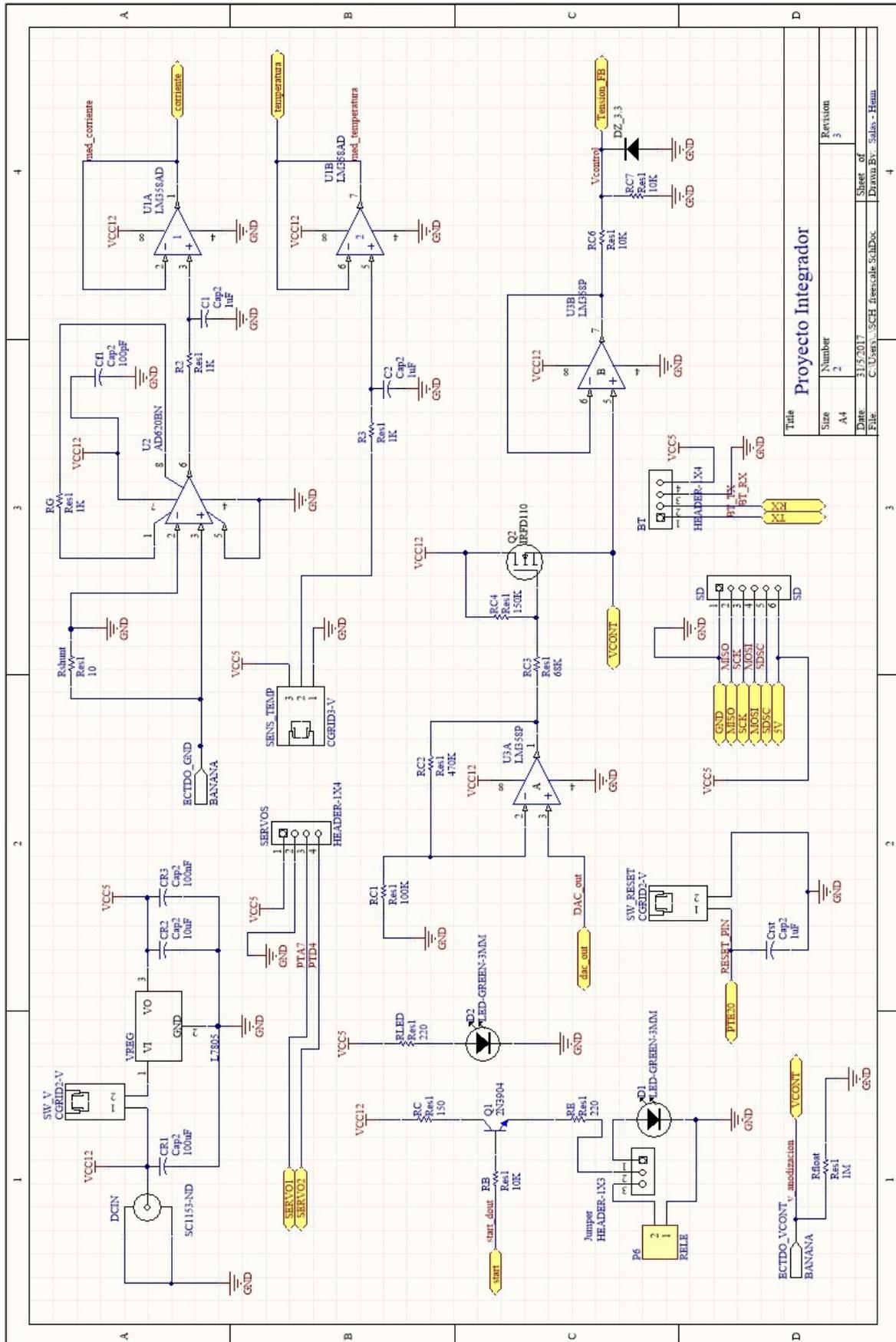
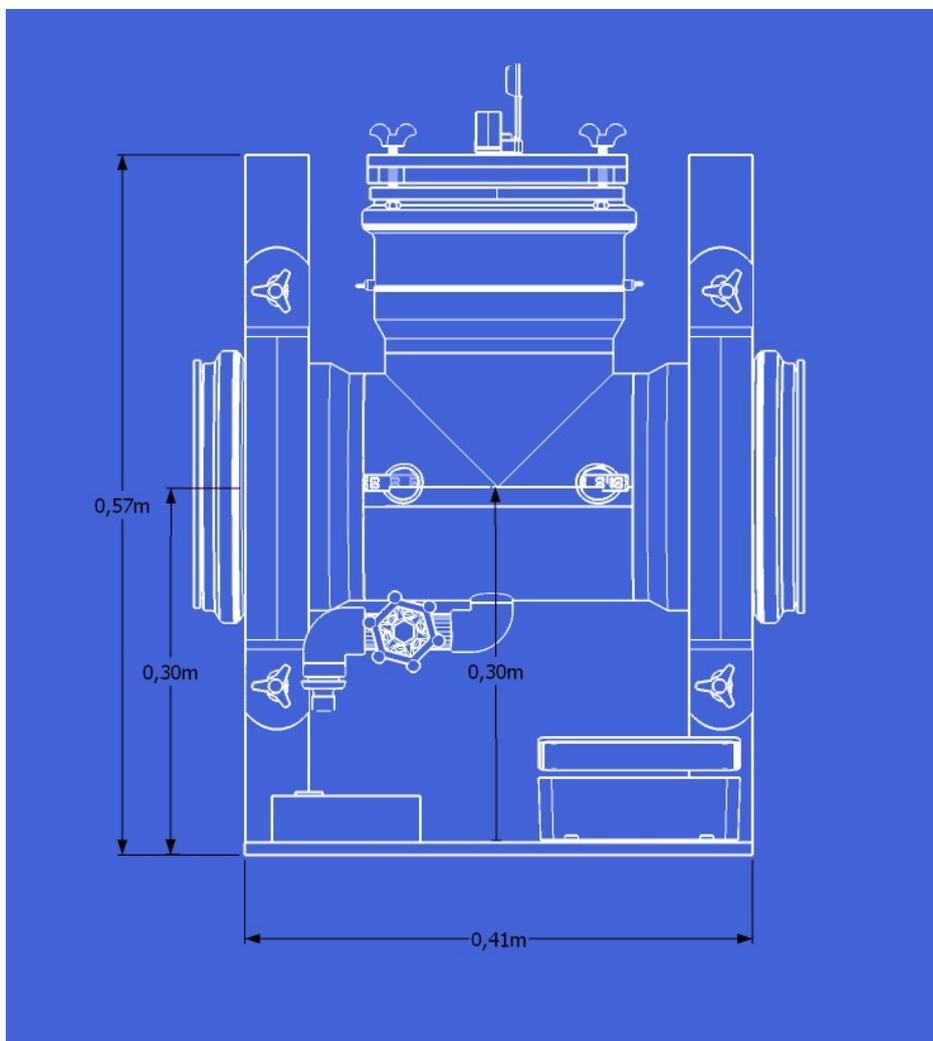
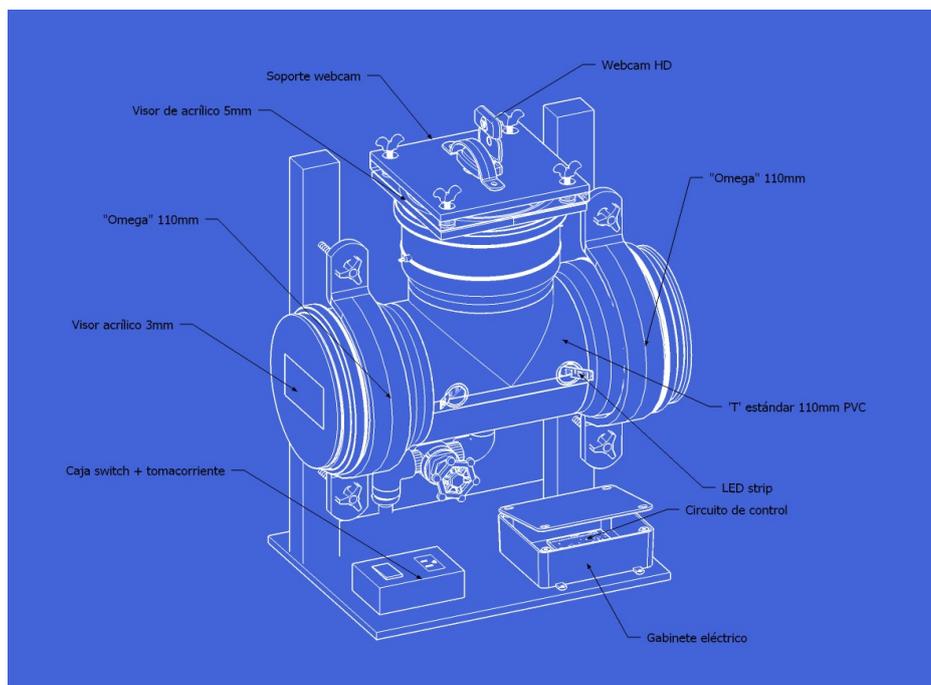
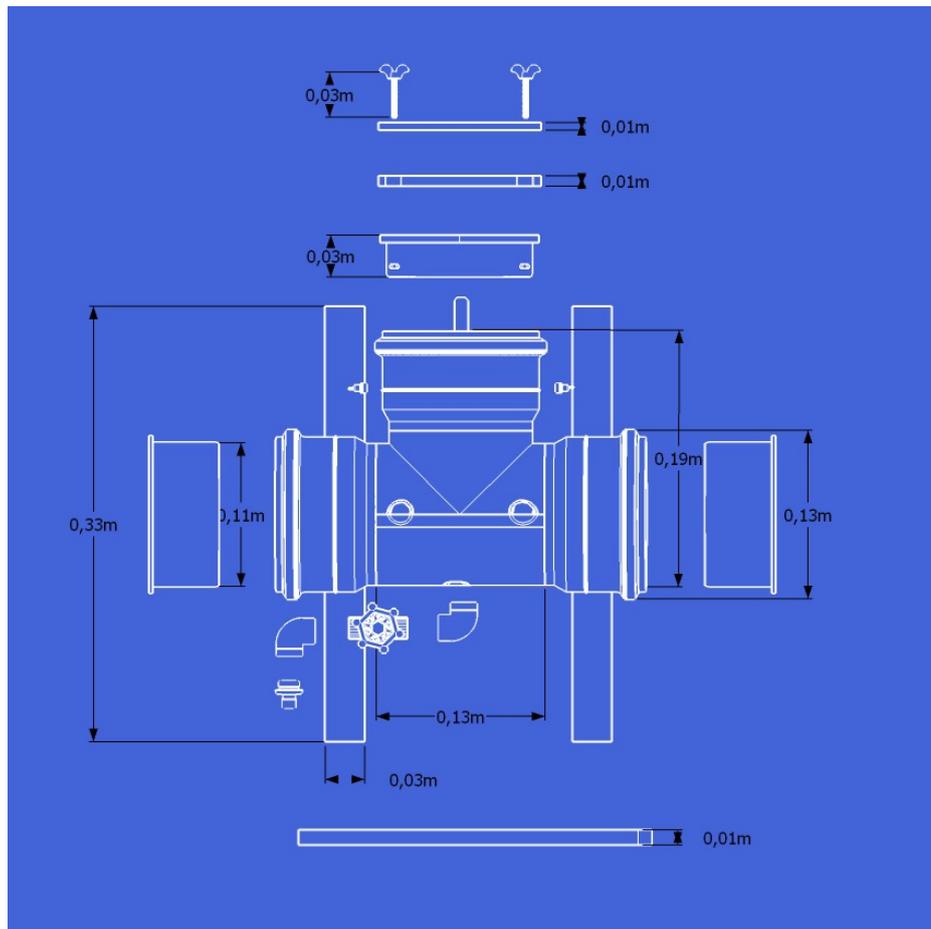
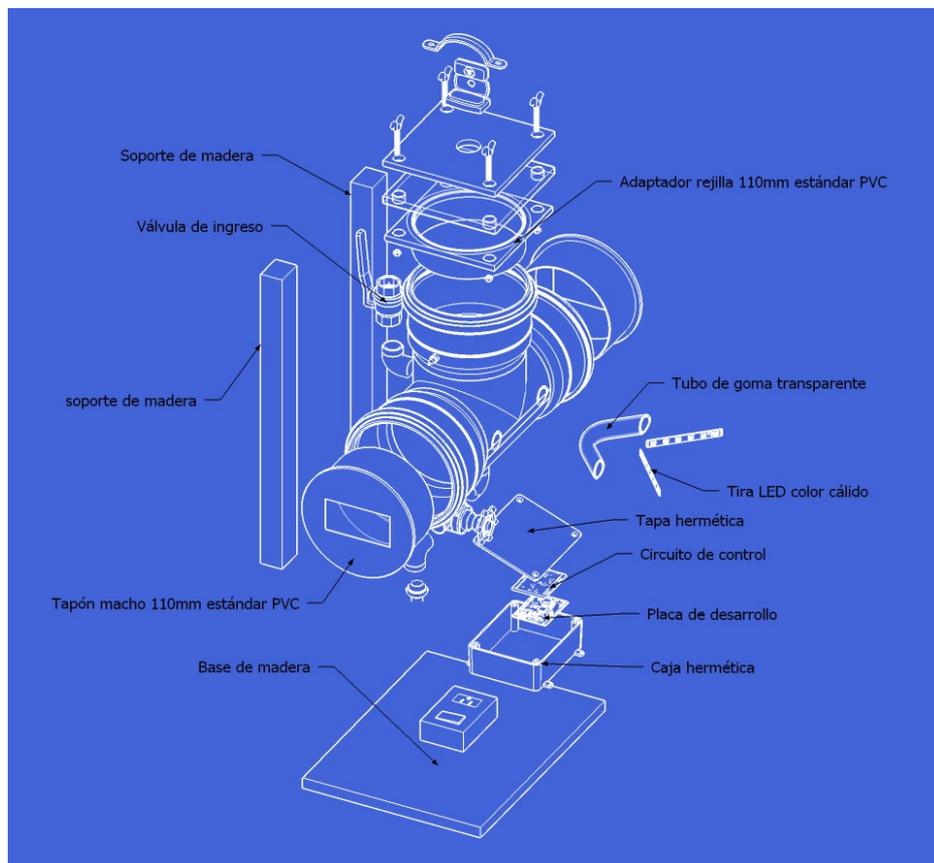


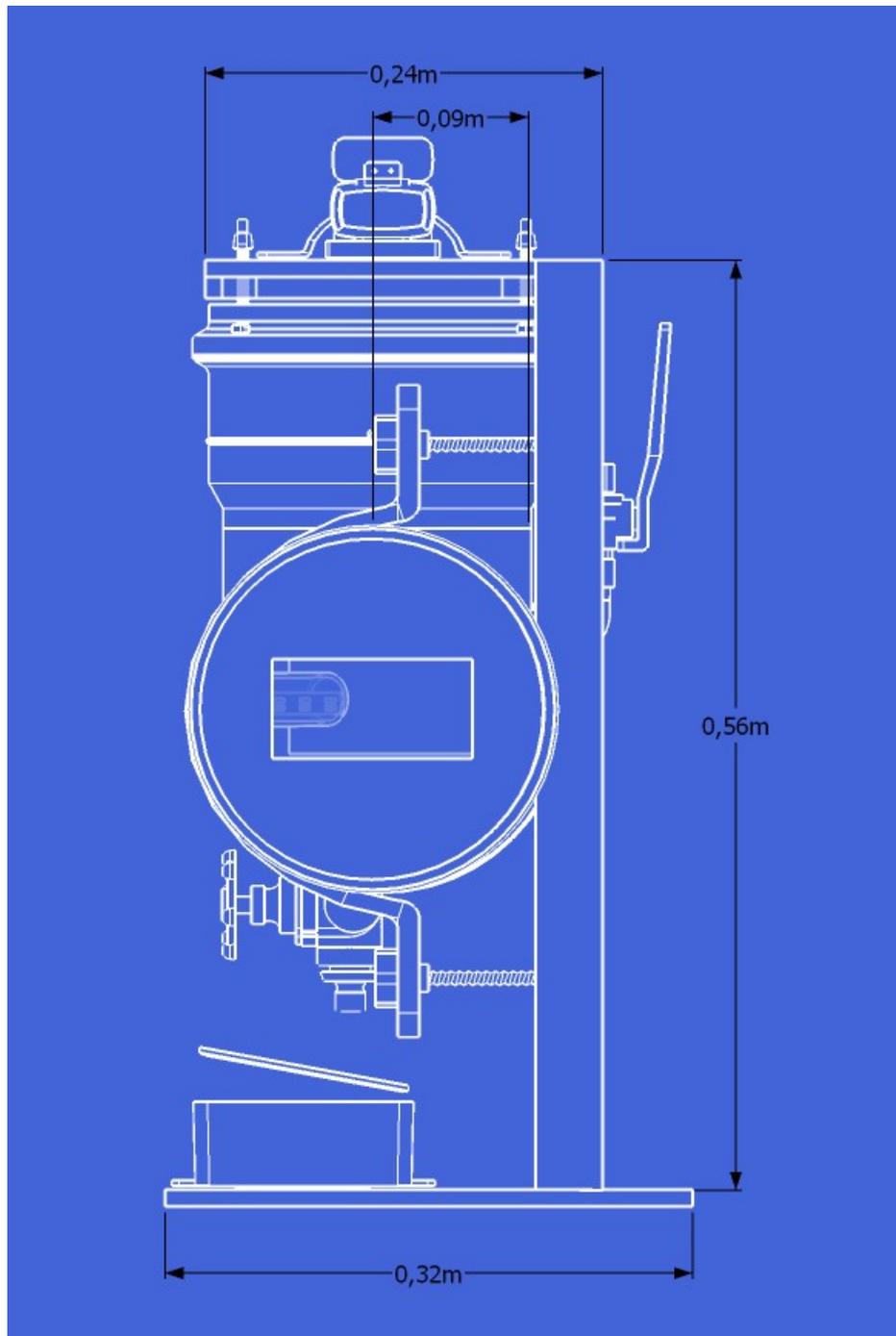
Fig. 12.1 Diagrama esquemático completo a implementar

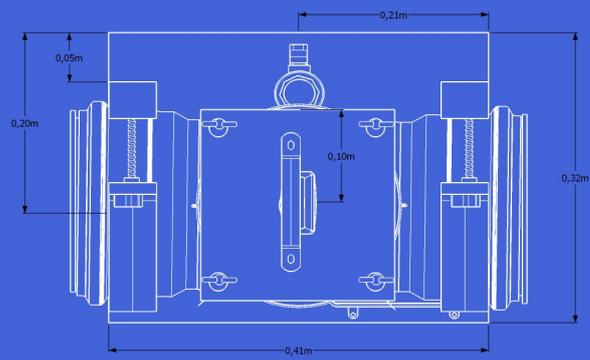
Anexo 2: Planos del prototipo de cuba electrolítica

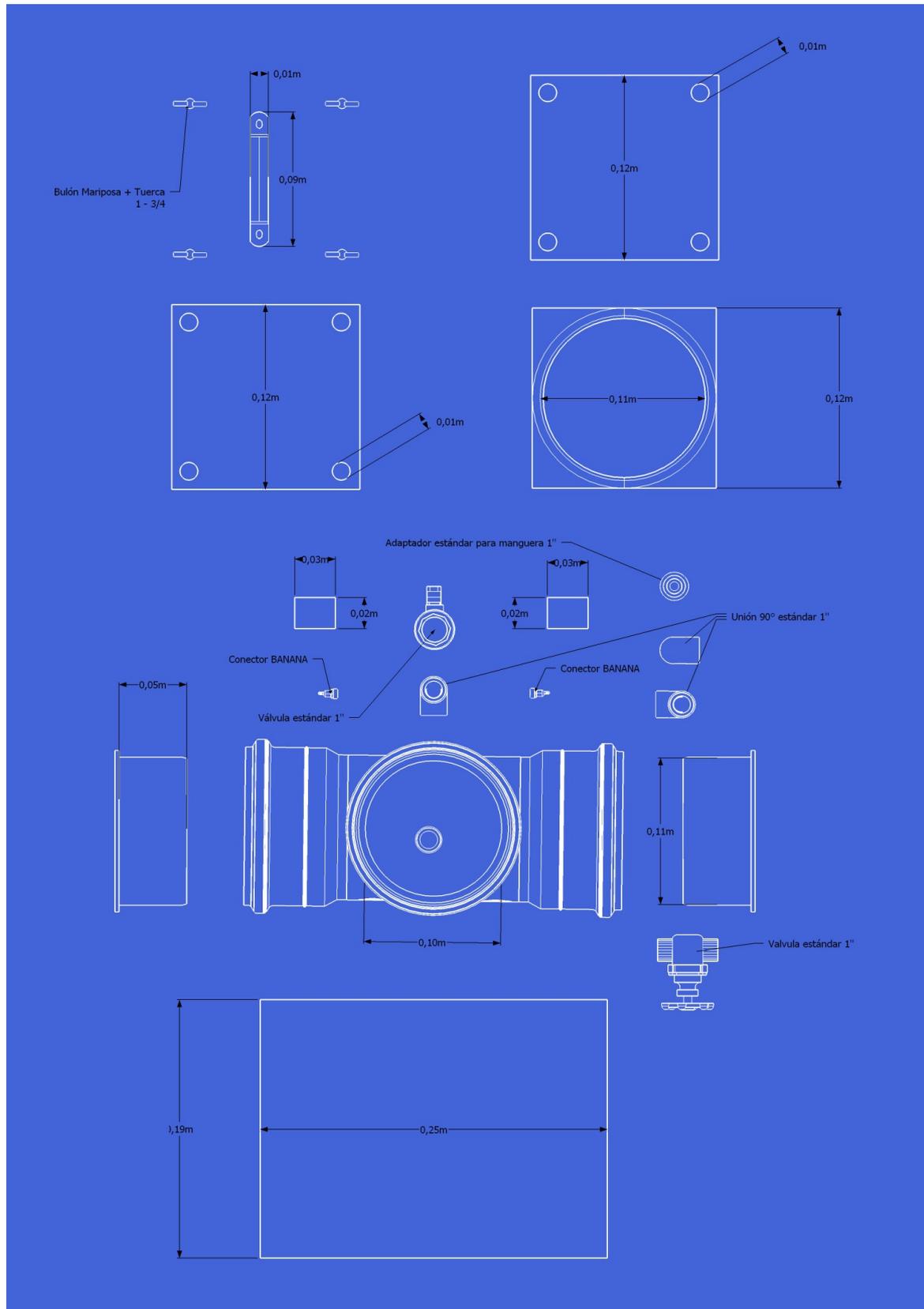




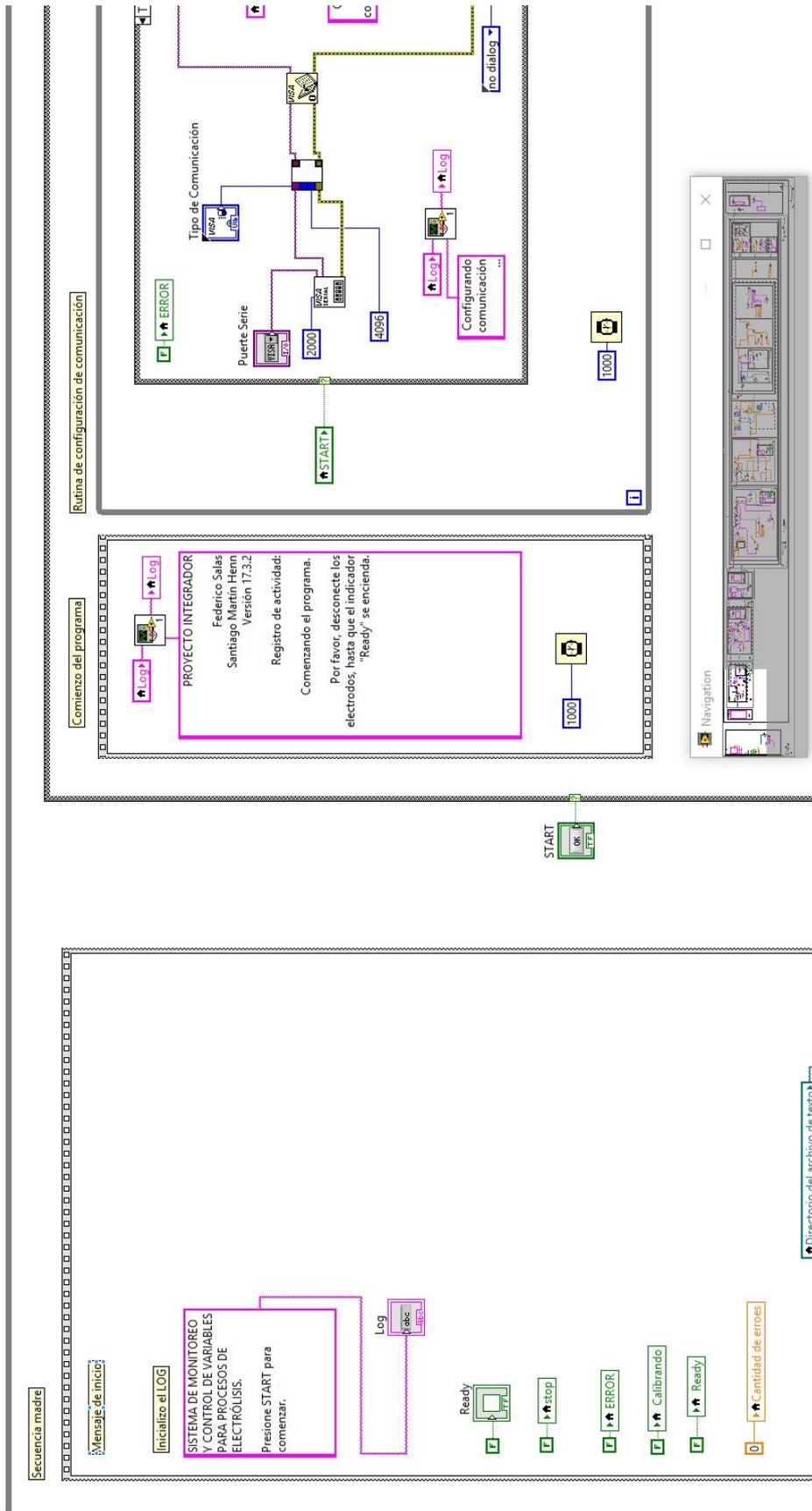


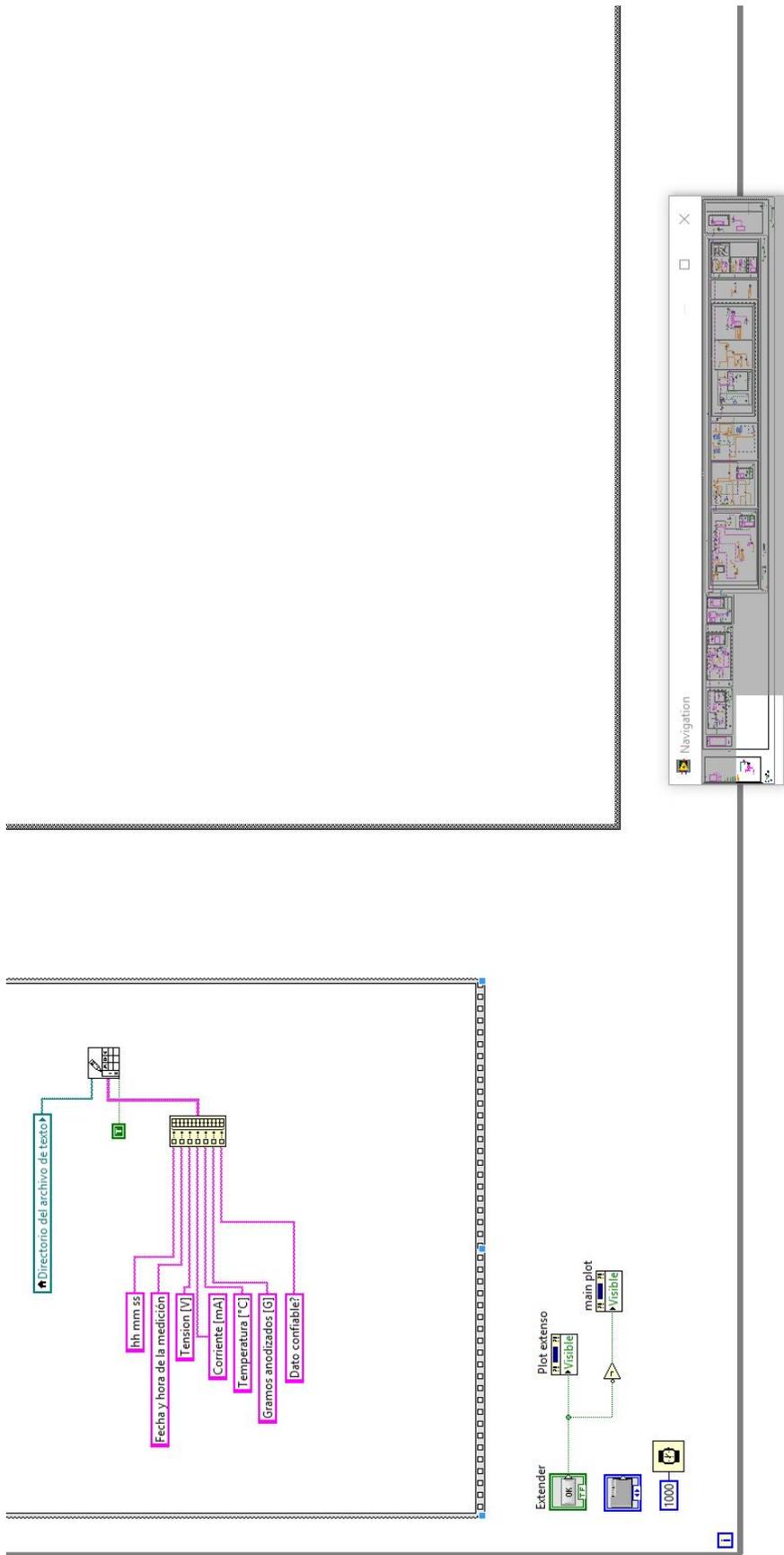


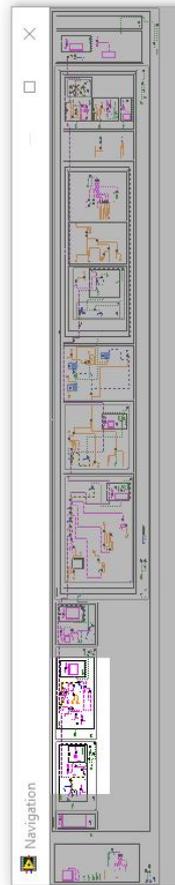
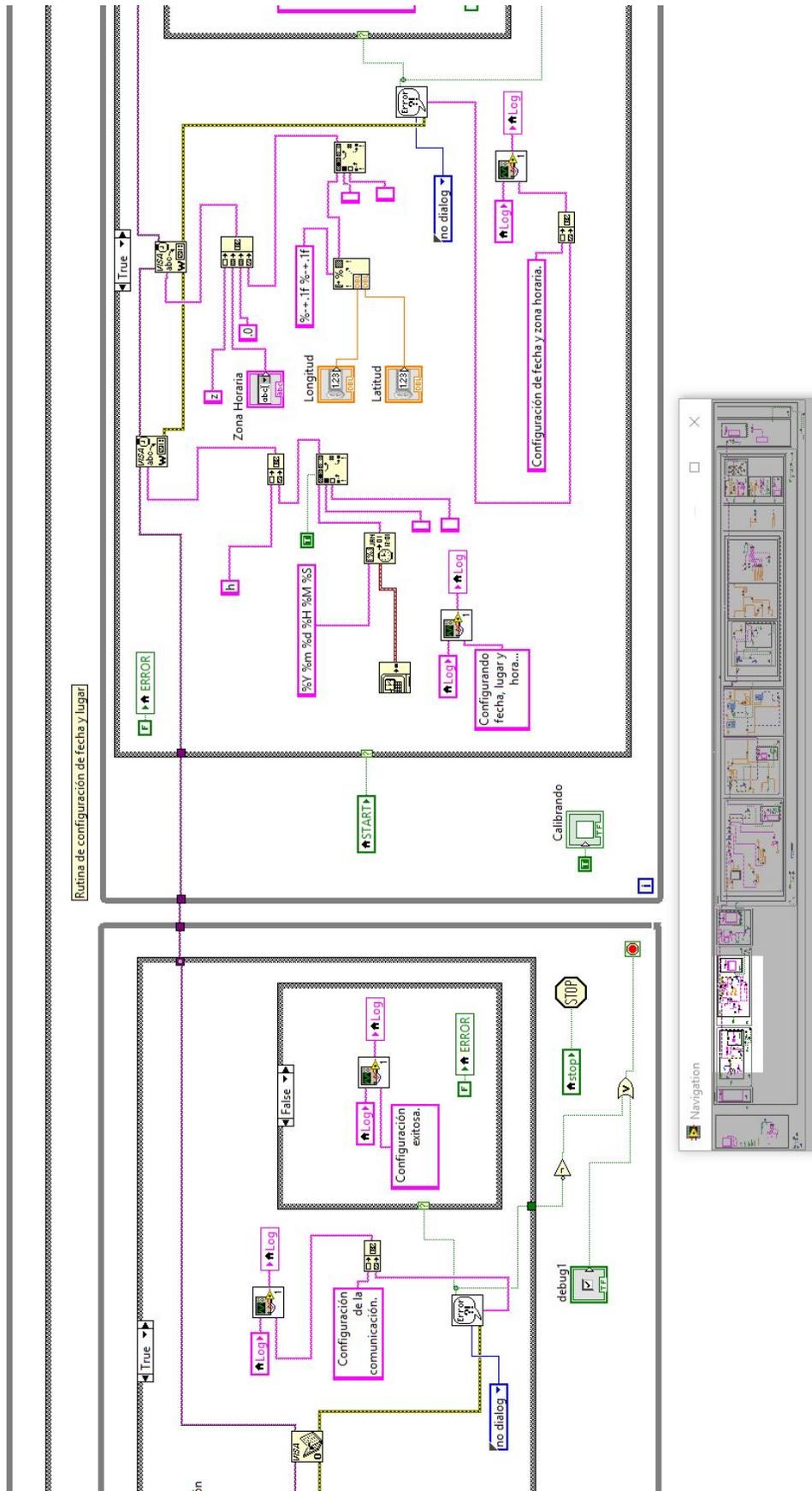


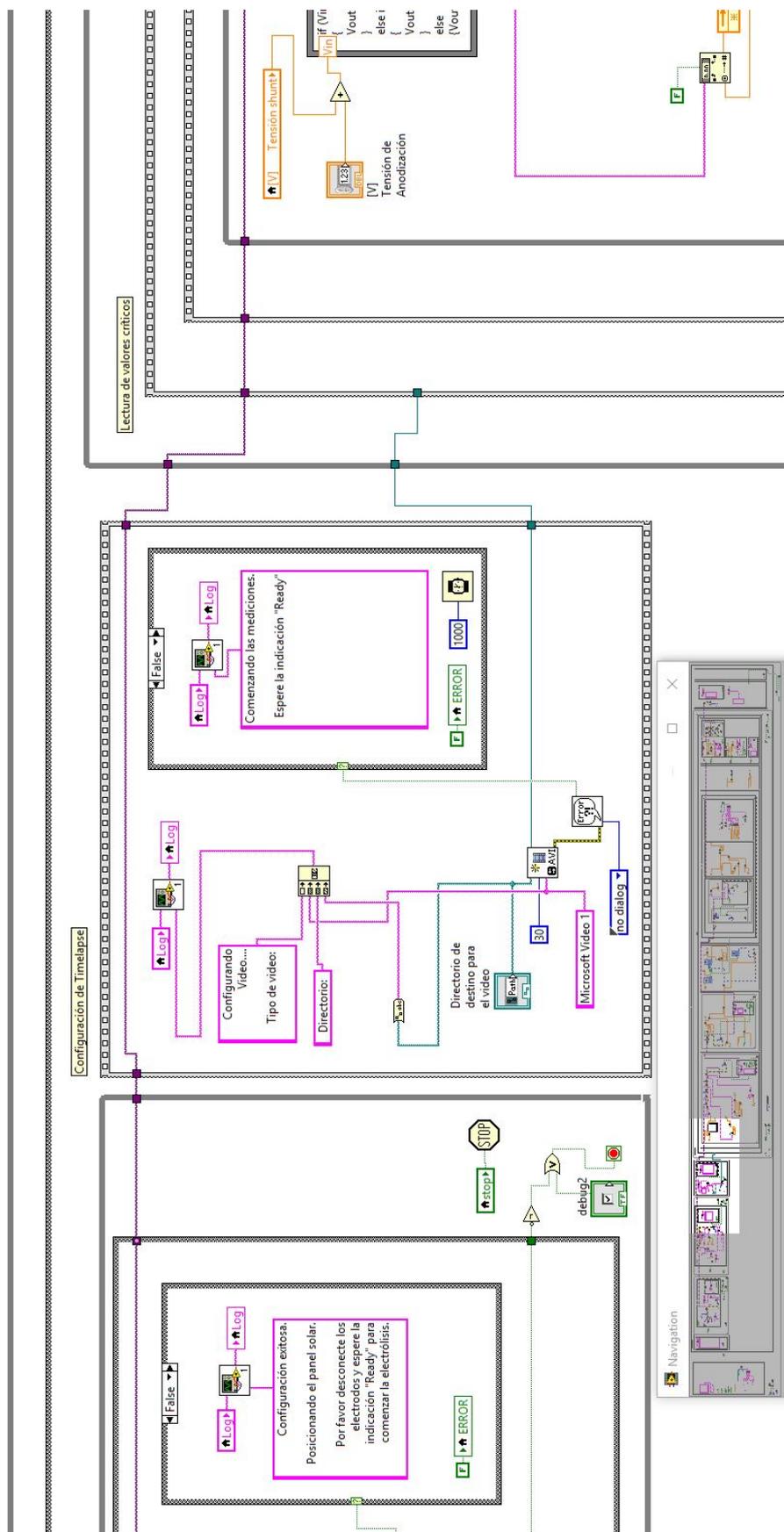


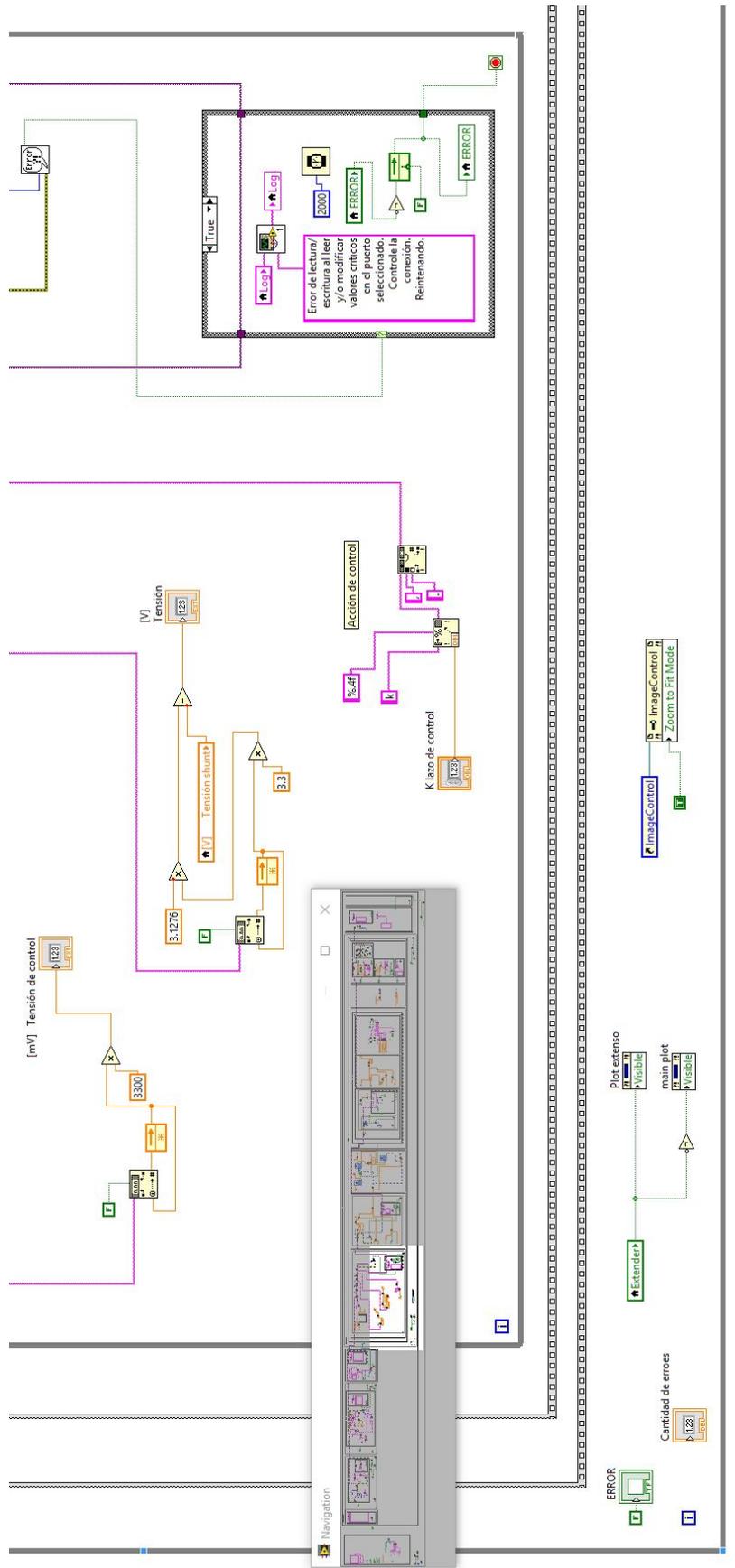
**Anexo 3: Diagrama de bloques de programa -
Instrumentación virtual**

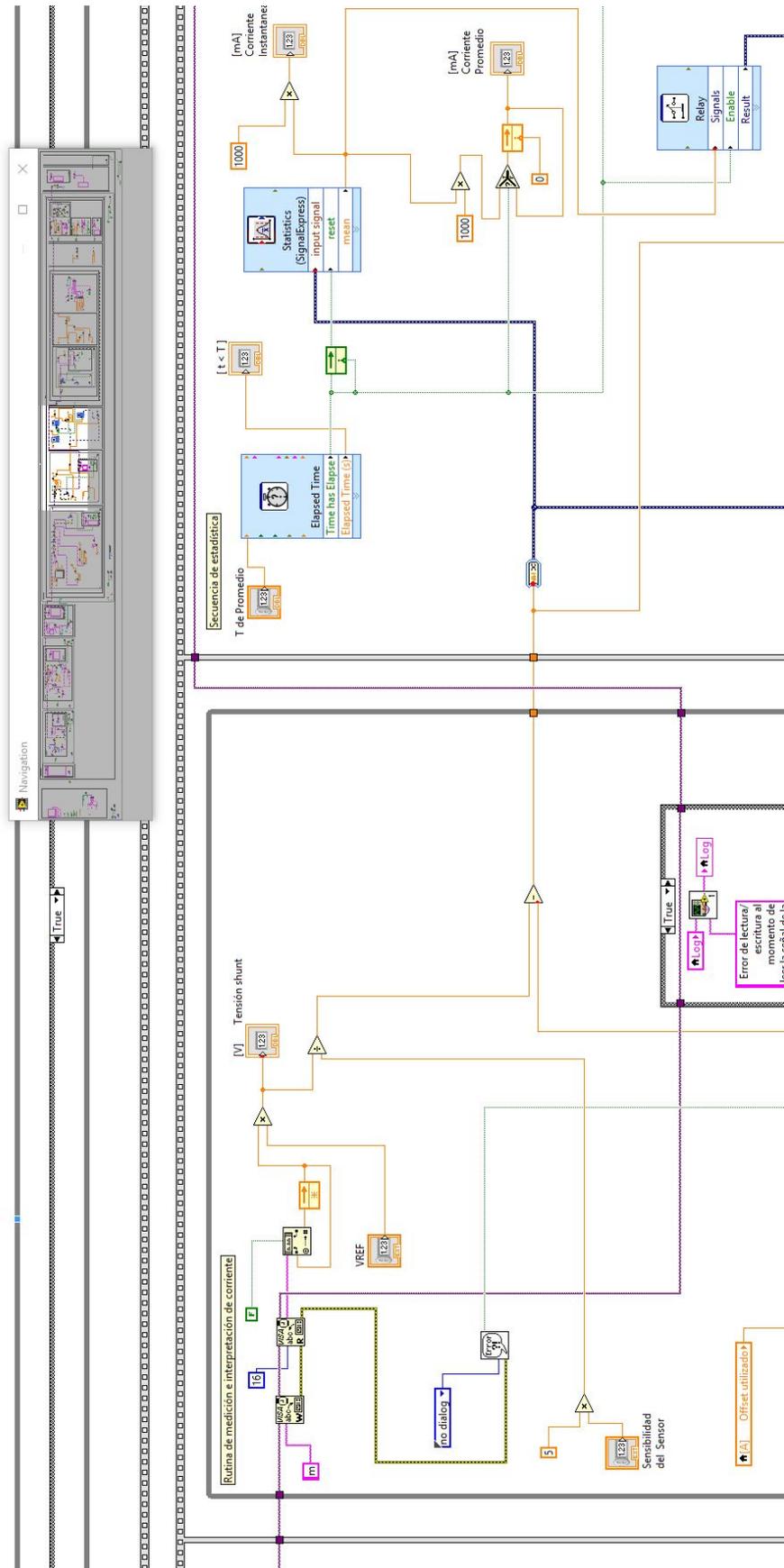


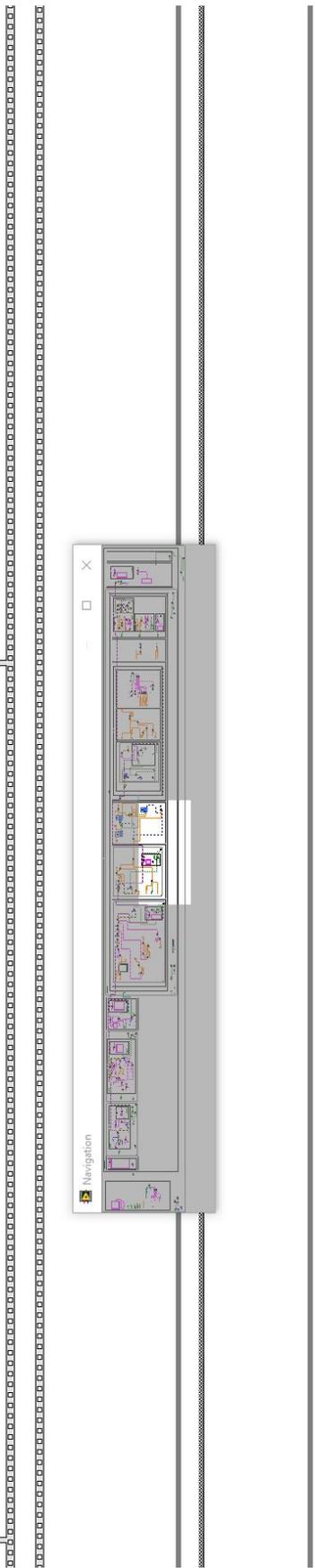
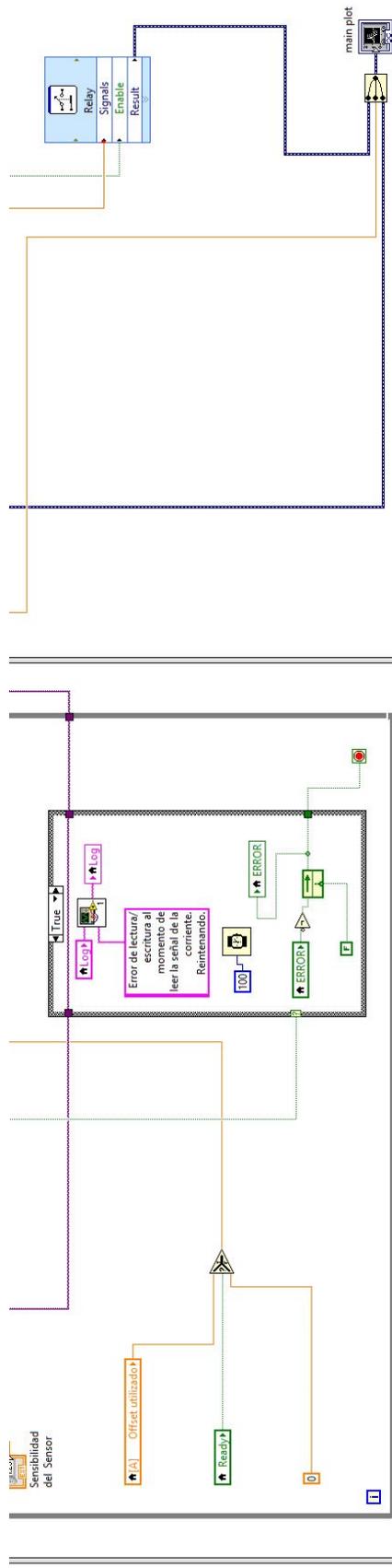


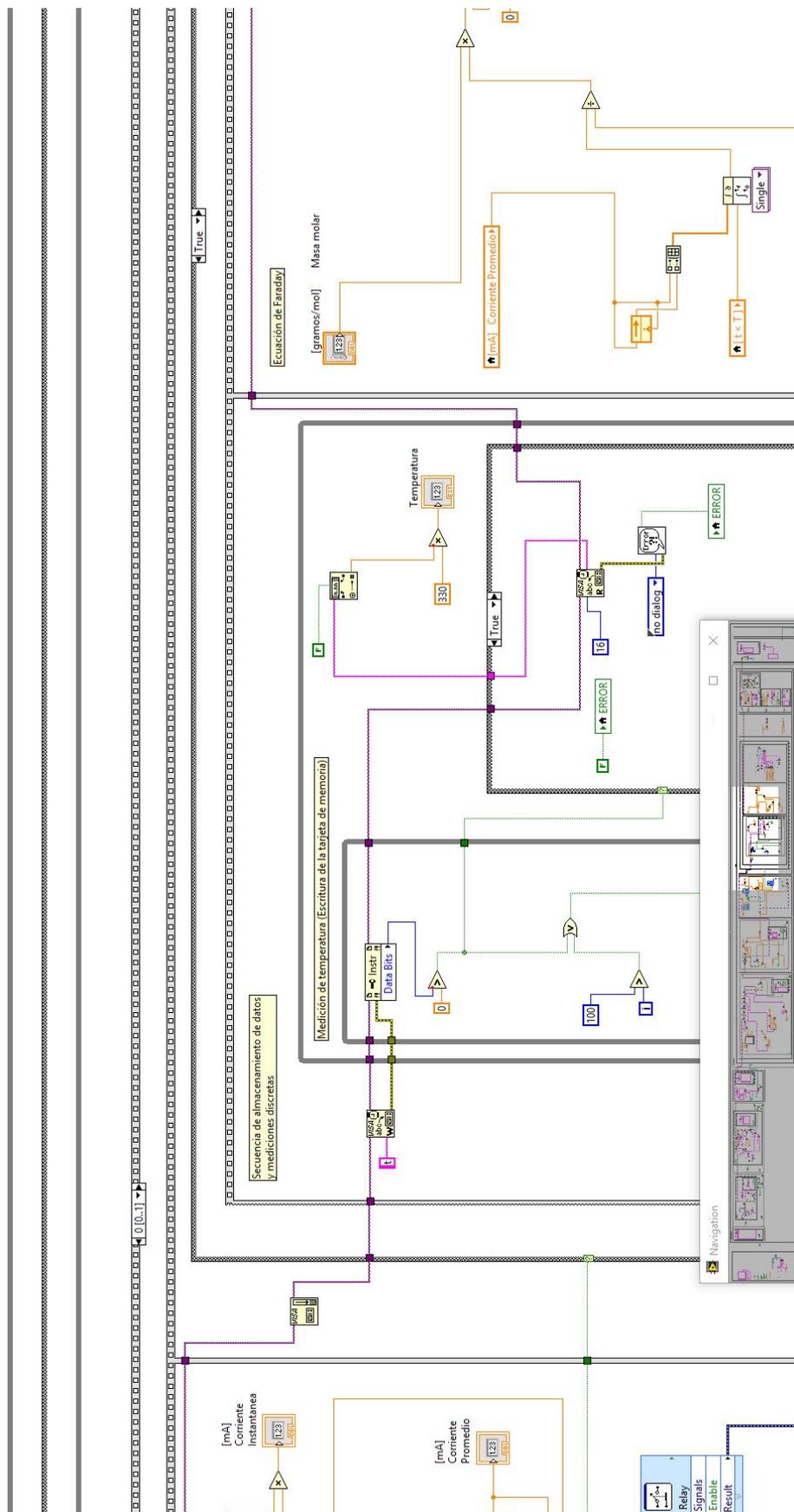


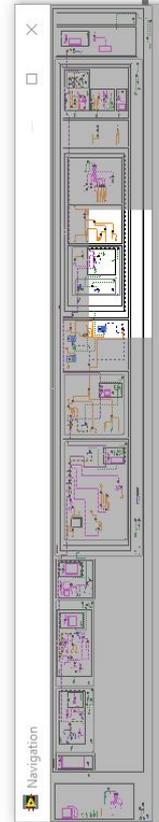
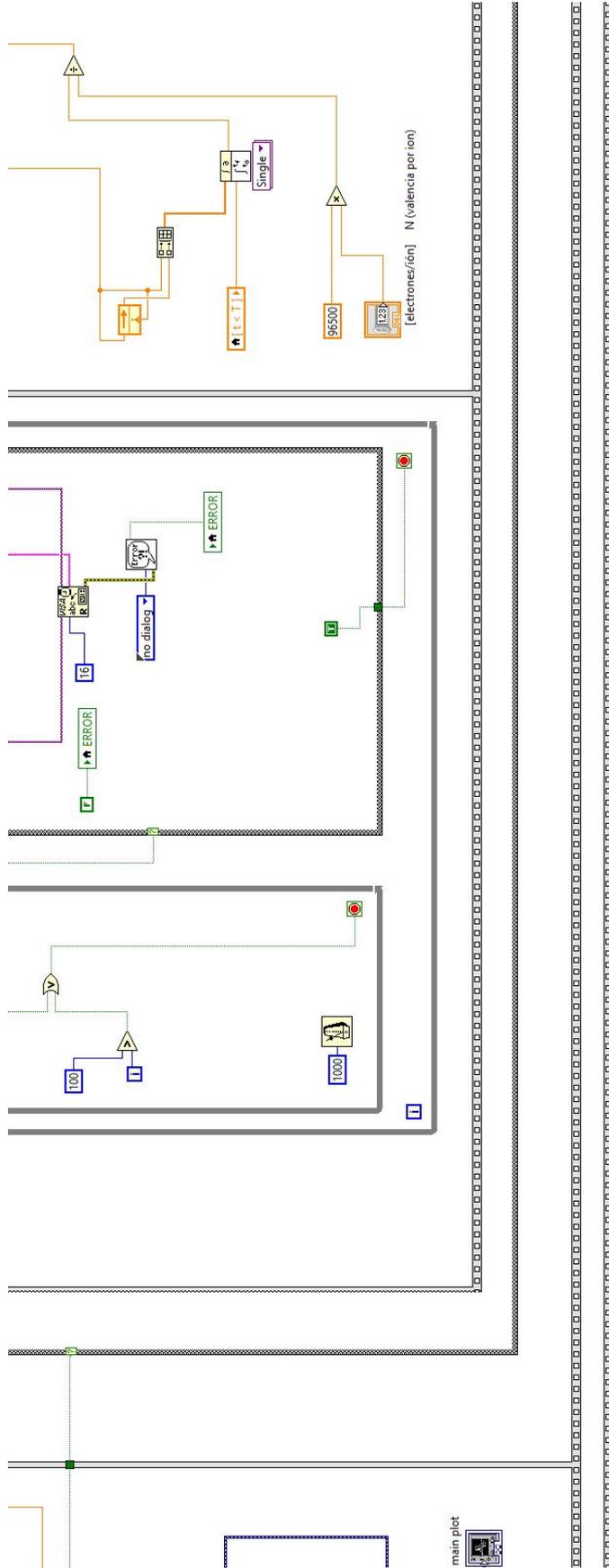


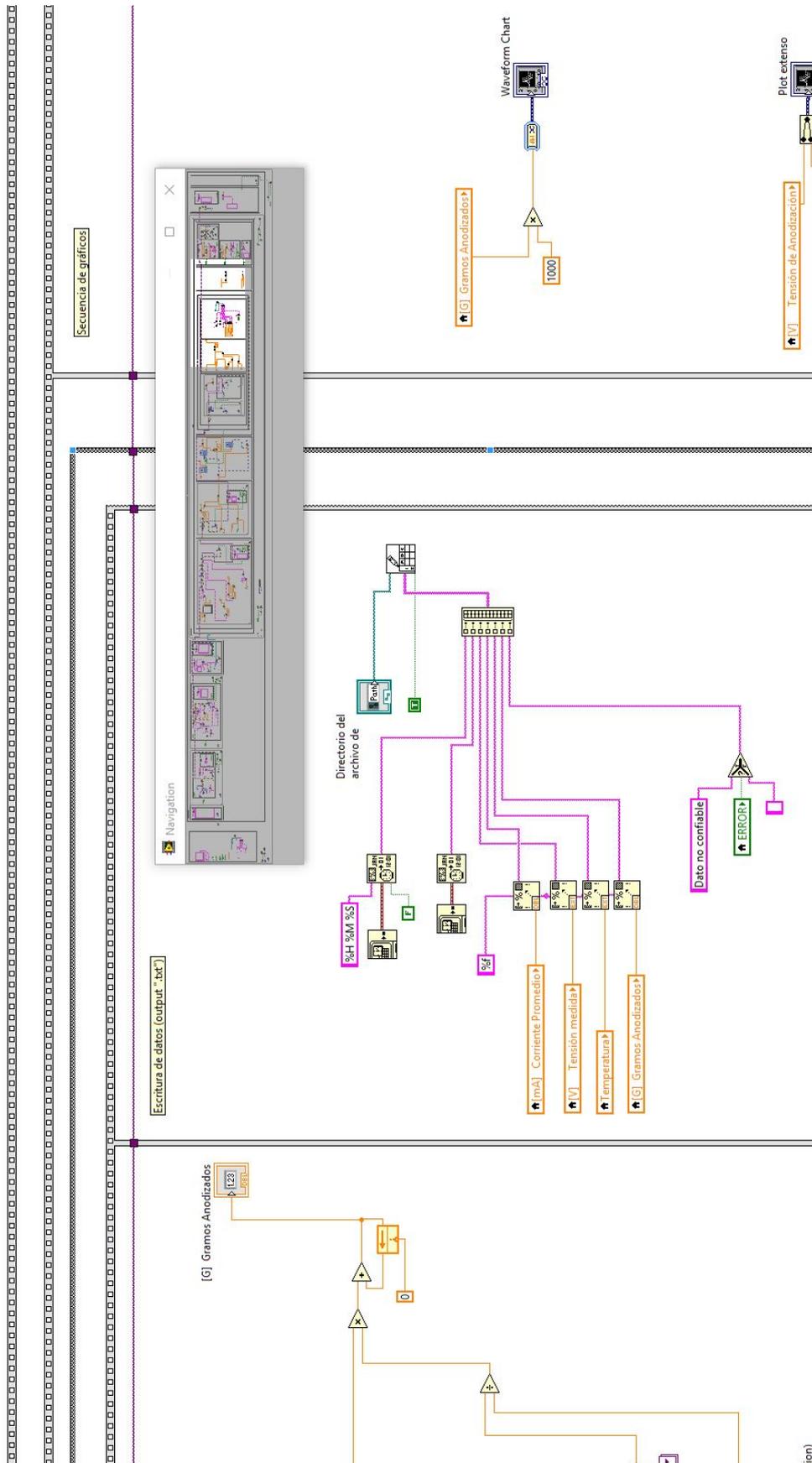




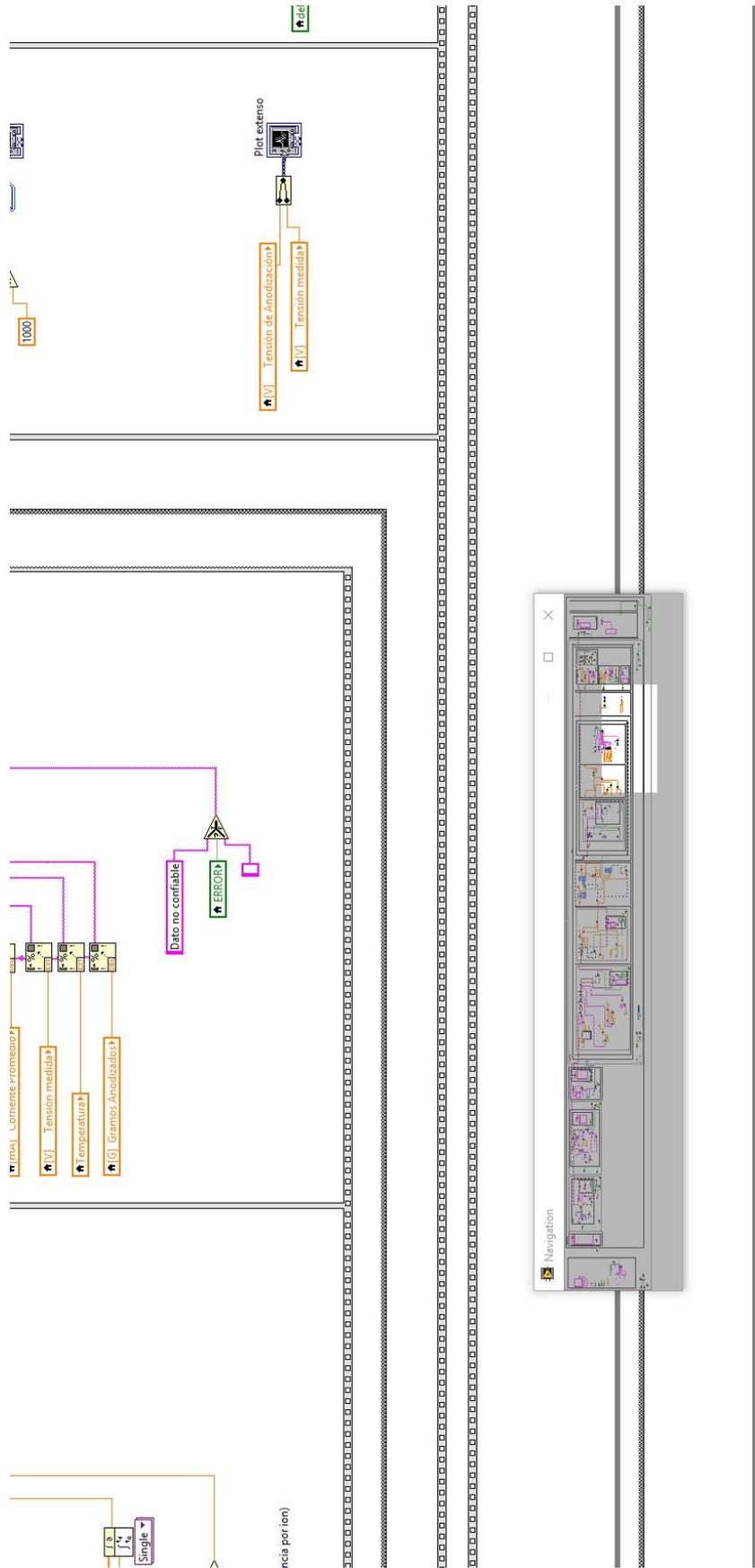


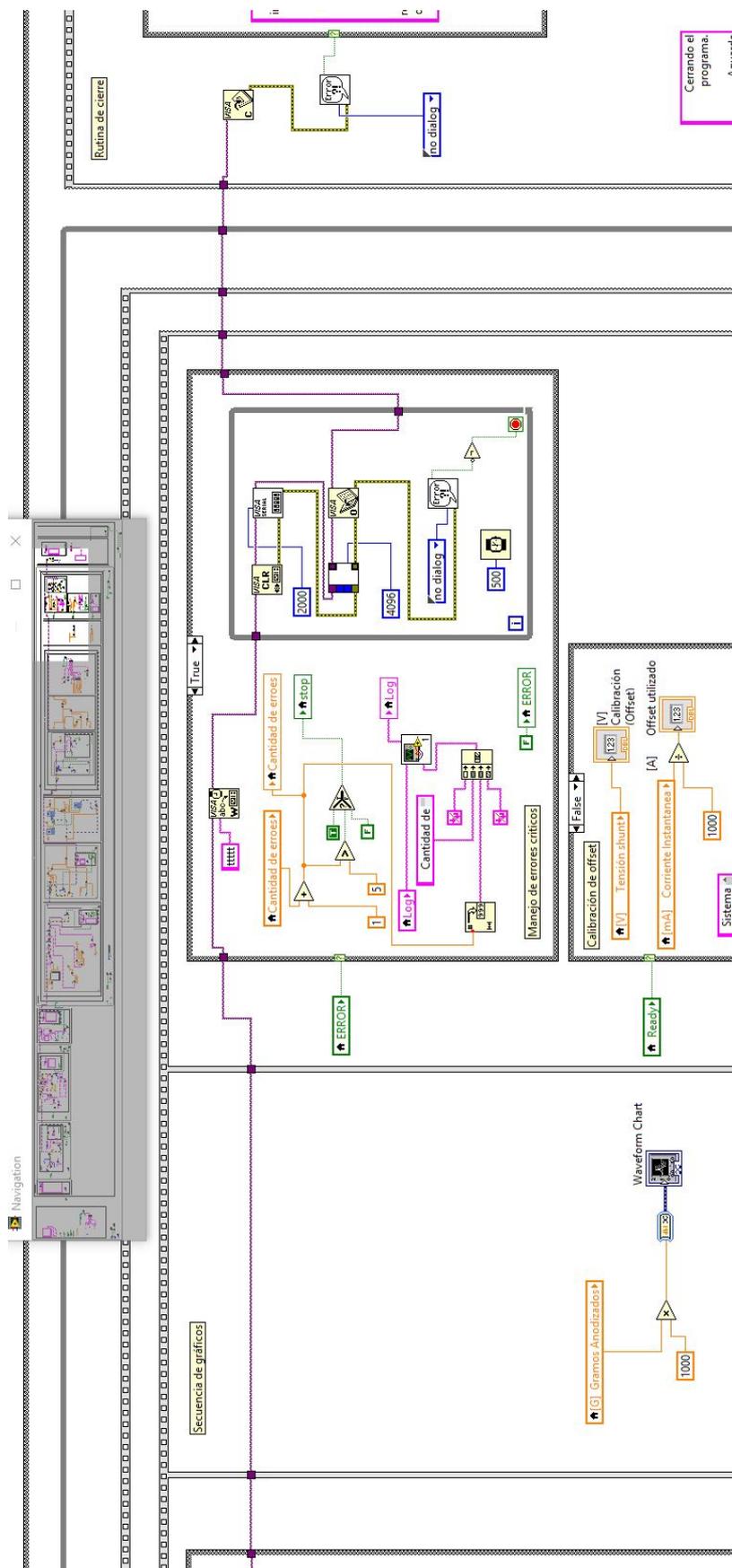


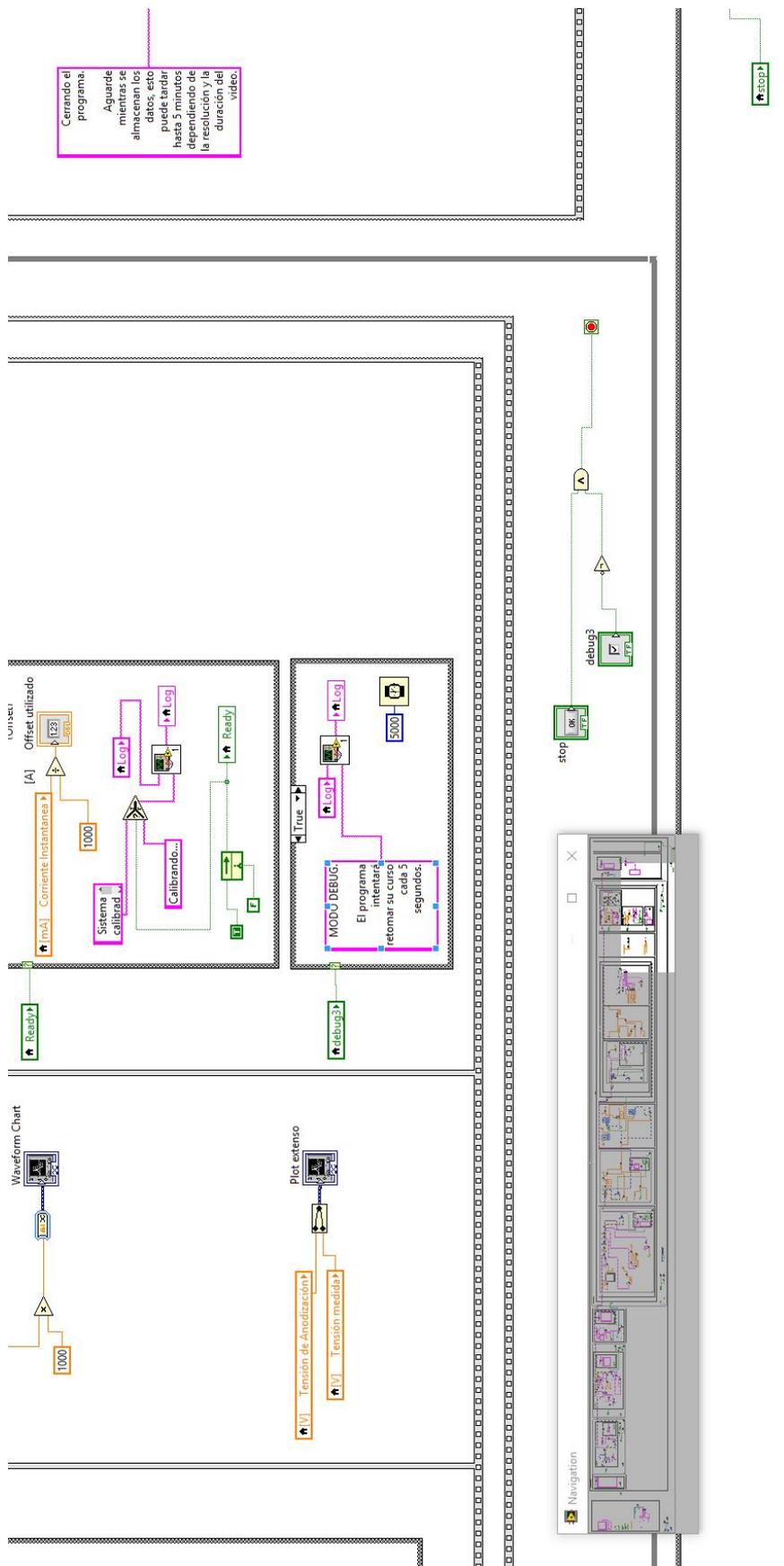




ion)

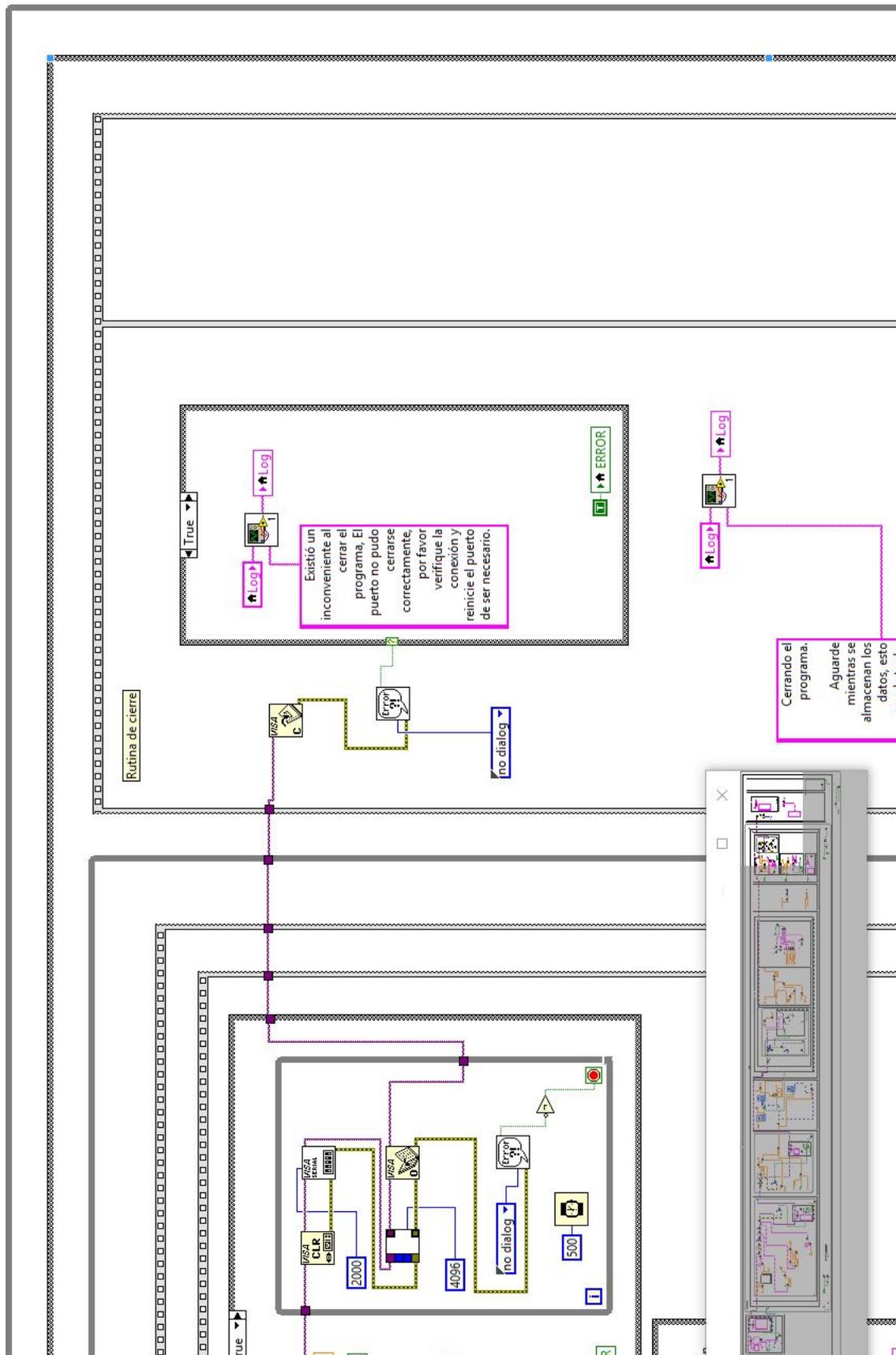


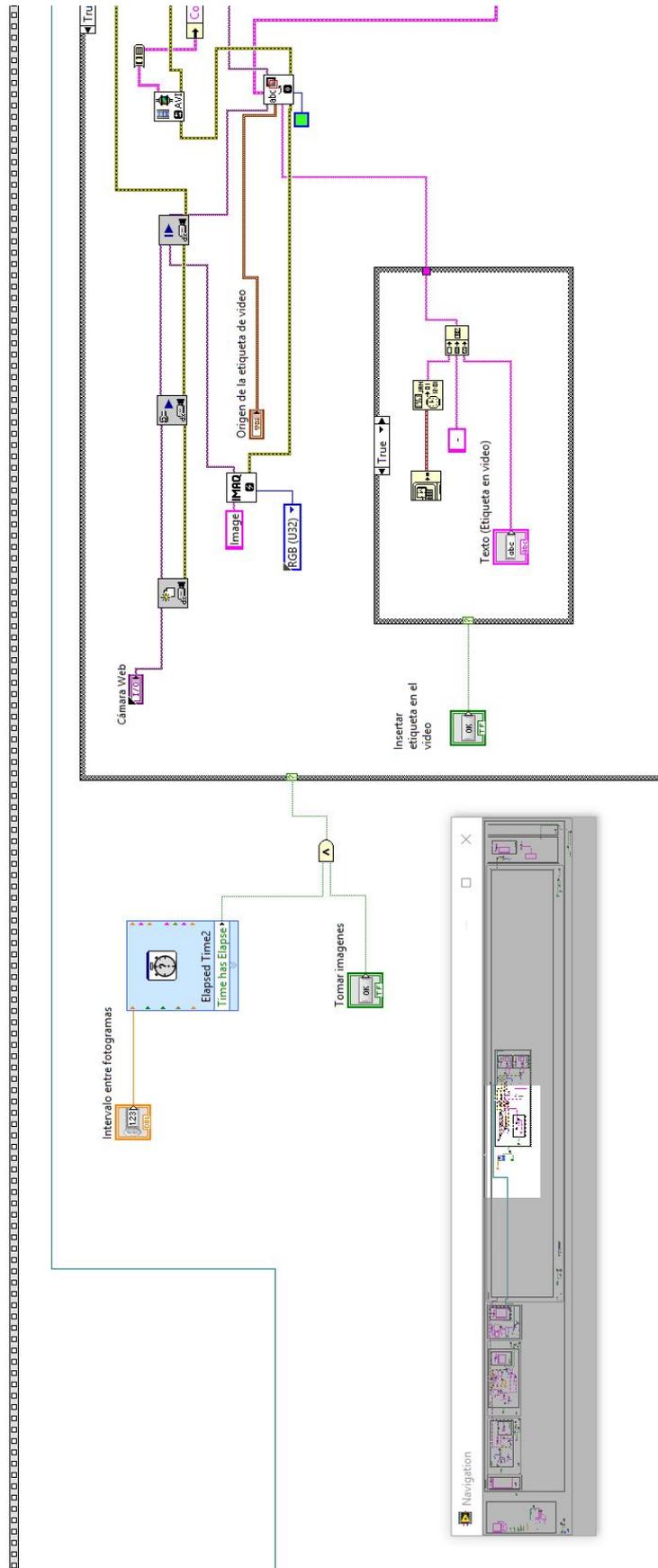


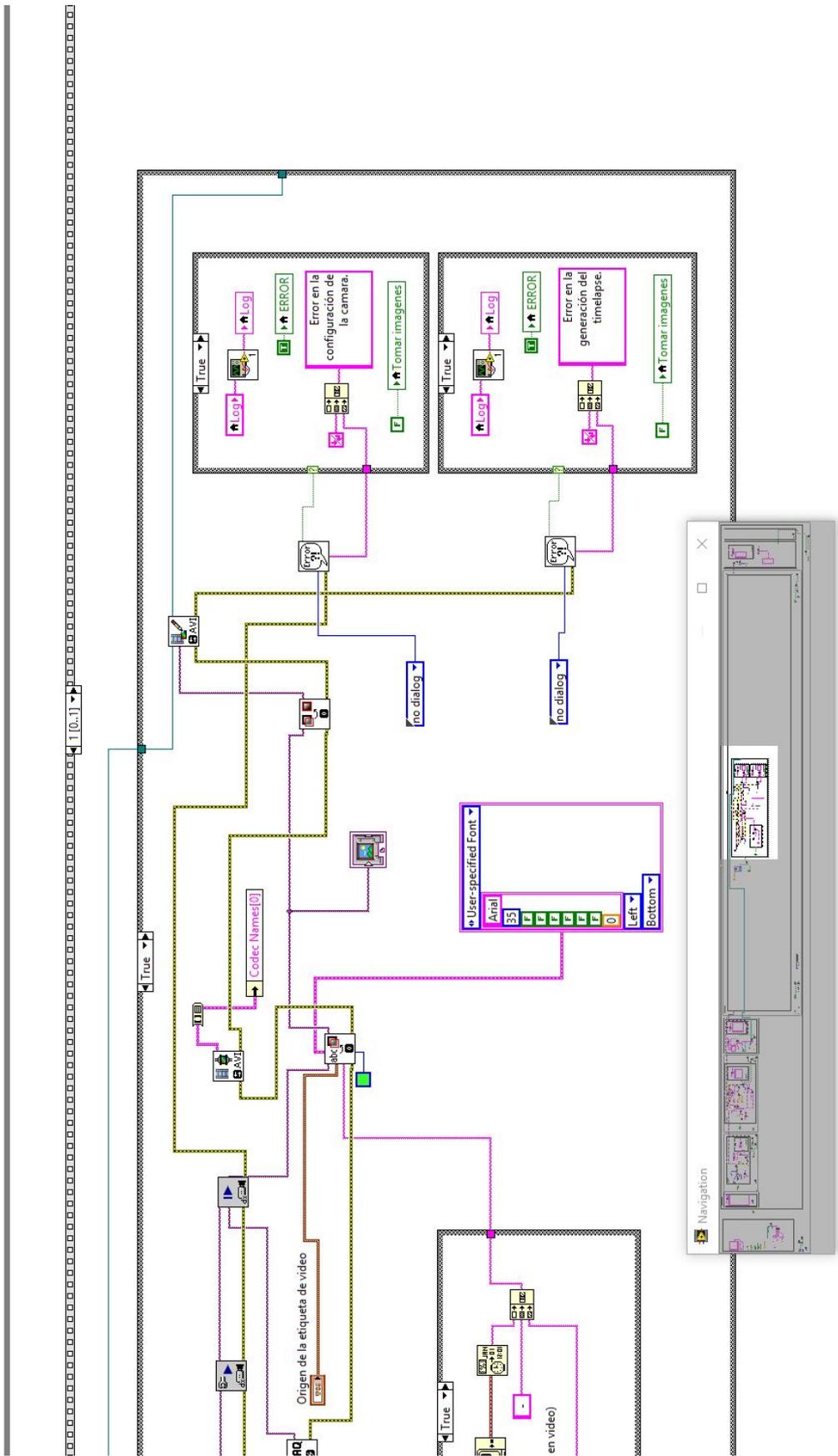


Cerrando el programa. Agradece mientras se almacenan los datos, esto puede tardar hasta 5 minutos dependiendo de la resolución y la duración del video.

stop







**Anexo de Proyecto Integrador 1: Solicitud de Aprobación
de Tema**



**Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y
Naturales AREA INGENIERÍA
ESCUELA DE ELECTRONICA
C.C. 755 - Correo Central - 5000 - CÓRDOBA**
Tel. Directo (0351) 33-4147 int 110
Conmutador: 433-4141 y 33-4152 - Interno 10

Sr.:
Cátedra PROYECTO INTEGRADOR
Atn. Prof. Ing. OSCAR A. CÁCERES

Me dirijo a Ud. a fin de solicitar la aprobación del tema del **Proyecto Integrador (PI)** que propongo a continuación:

TEMA

Nombre: Sistema de filtrado por electrólisis, control y monitoreo de variables
Descripción: **Ver Anexo I**
Desarrollo del prototipo: sí

DIRECTOR DE PROYECTO

Nombre: Ing. Julián Pucheta
Cargo: Profesor Titular
Dirección Personal o Laboral: Av. Velez Sarsfield 1611 – C.P. X5000EAS – FCFyN - UNC
—
Cel: (0351) 156307938
Firma del Director / Co Director:

DATOS DEL ALUMNO

Nombre y Apellido: Santiago Martín Henn
Matrícula: 36357262
Materias que faltan aprobar: 4 (Contando PPS y Proyecto Integrador)
Ricardo Rojas N° 8665, Argüello, Córdoba 5147
Cel: (0351) 152307532
e-mail: santiagohenn@gmail.com

Firma:

DATOS DEL ALUMNO

Nombre y Apellido: Federico Nahuel Salas

Matrícula: 37618950

Materias que faltan aprobar: 6 (Contando PPS y Proyecto Integrador)

Calandria 548-torre 3-depto 9, Quebrada de las Rosas, Córdoba

Cel: (0351)158079839

e-mail: federicosalas9@gmail.com

Firma:

OBJETIVO

El objetivo principal es obtener un sistema de separación de partículas aplicando electrólisis a un determinado volumen de agua. Dicho sistema debe permitir medir las variables involucradas, como así también controlarlas de manera tal de lograr la anodización de las partículas suspendidas en la solución en forma eficaz y supervisada.

Los límites de estabilidad y error del sistema deben ser conocidos, además tienen que estar dentro de rangos aceptables. Por otro lado, debe ser posible tomar muestras en el seno de la solución, para validar en laboratorio las concentraciones del elemento a filtrar. Debe además ser de fácil uso y bajo costo. Los elementos a utilizar tienen que ser de fácil acceso y deben obedecer medidas estándar (de tensión, plomería, interfaz de usuario, etc...).

El objetivo social del proyecto consiste en mejorar la calidad del agua para consumo en regiones con esta necesidad.

Antecedentes de proyectos similares: En este laboratorio es la primera vez que se desarrolla una máquina de estas características.

Duración y fases de las tareas previstas: En el ANEXO II, se presenta un diagrama a este efecto.

METODOLOGÍA

Lugar previsto de realización:

Lugar previsto de realización: Laboratorio de Investigación Matemática Aplicada a Control – UNC - FCEFYN

Requerimiento de Instrumental y equipos

Equipos de medición del Laboratorio de Electrónica, Plataforma embebida, Amplificadores de Instrumentación, computadoras portátiles.

Inversión estimativa prevista por el alumno. \$5000

Apoyo Económico externo a la Facultad Se solicitó una beca al ministerio de ciencia y tecnología.

Referencias Bibliográficas o de Software:

Cursos en sistemas de medición, instrumentación virtual, programación y simulación, etc...

.....

Firma del alumno

.....

Fecha

.....

Firma del alumno

.....

Fecha

ANEXO I

DESCRIPCIÓN Y DESARROLLO DEL PROYECTO

El proyecto surge a partir de una propuesta del laboratorio donde será realizado (L.I.M.A.C.). Se cuenta con asesoría y supervisión de varios ingenieros experimentados, así como un lugar adecuado en cuanto a normativas de higiene y seguridad para realizar el proyecto.

La alternativa tecnológica elegida, está sustentada en una serie de publicaciones científicas que presentan modelos matemáticos para la aplicación de la electrólisis como herramienta principal en el proceso de separación de sustancias nocivas inmersas en el agua dulce (O eventualmente, sustancias de residuo que contengan partículas nocivas y/o útiles), pero no presentan ninguna solución de ingeniería o propuesta de aplicación. El equipo que trabajará en este proyecto cuenta con todos los conocimientos que brinda la carrera de ingeniería electrónica, como así también con la experiencia de la práctica profesional supervisada (P.P.S.), la cual se centró en herramientas de instrumentación virtual y adquisición de datos mediante sistemas embebidos. Existe además una motivación social muy importante, ya que en el mundo se evidencia un grave problema de contaminación hídrica, particularmente agua para consumo contaminada con arsénico, plomo, flúor y/u otros metales pesados.

Como se mencionó anteriormente el proyecto a realizar como tesis de grado tuvo sus inicios en la P.P.S. En ésta etapa el equipo de trabajo se centró principalmente en lo que a investigación respecta como así también en la adquisición de herramientas útiles para el desarrollo del trabajo final. Entre las actividades desarrolladas en la práctica profesional se encuentran: la selección del microcontrolador más eficiente para el dispositivo a realizar. Una vez seleccionado el microcontrolador se debió aprender a utilizarlo aprovechando las herramientas ofrecidas por el desarrollador, realización de un curso de instrumentación virtual (LabView) dictado en la F.C.E.FyN., pruebas y selección de los sensores a utilizar, aprendizaje de LaTeX para realizar la documentación necesaria, desarrollos iniciales en software, desarrollos iniciales en hardware y diseño de un prototipo en PCB.

El proyecto entonces estará principalmente basado en la familia de microcontroladores ARM CórteX M0 de Freescale, (Ahora parte de NXP, Phillips), ya que el mismo cuenta con una extensa documentación, firmware de acceso libre y es de muy bajo costo y fácil acceso. Servirá de interface con una computadora en las primeras etapas, y como sistema embebido de funcionamiento autónomo más adelante. Se utilizará software de instrumentación virtual para el análisis de datos por computadora, estos datos serán transmitidos por protocolo serial. Además, se utilizarán etapas de acondicionamiento de señal y actuación de diseño propio, basados en amplificadores de instrumentación, amplificadores operacionales de elevada precisión y bajo ruido, y componentes electrónicos de uso genérico (Transistores MOSFET, y componentes pasivos de baja tolerancia). De todos ellos el equipo de trabajo cuenta con un profundo conocimiento y experiencia en diseño y uso. Además, se utilizarán arreglos de celdas fotovoltaicas estándar, de aproximadamente 5 Vatios. Las mismas tienen un reducido tamaño, bajo costo y suficiente potencia para el objetivo propuesto (alimentación de

todo el dispositivo). Los conectores y mandos de usuario serán de medidas estándar, con la mayor robustez posible.

La familia de microcontroladores elegida puede ser programada en assembler, C, o C++. Se utilizará C++ para el desarrollo del proyecto. Este lenguaje cuenta con una extensísima documentación disponible, y el equipo de trabajo tiene mucha experiencia en el mismo. Al ser un lenguaje orientado a objetos se ajusta perfectamente a las condiciones de abstracción y modularización que se plantean como metodología de desarrollo. Al utilizar la plataforma MBED en el microcontrolador, se puede acceder a las herramientas de desarrollo de dicho sistema operativo embebido (Actualmente un sistema de punta para el “internet de las cosas”). Estas herramientas de desarrollo son de código abierto y están pensadas para ser abordadas en un lenguaje de C++, contando con un acceso a librerías y documentación al instante en la aplicación de desarrollo que brinda (Esta última, es libre y gratuita). Cabe destacar, además, que se utilizará un lenguaje de programación visual gráfico (También llamado código G) para desarrollar la instrumentación virtual necesaria que permita realizar el análisis en tiempo real por computadora.

Por lo tanto, resumiendo, el desarrollo final consistirá en la realización de un dispositivo funcional que permitirá, utilizando el método electrolítico, separar distintos tipos de sustancias en soluciones acuosas. Dicho dispositivo constará de un tanque hermético con válvula de vaciado, válvula de escape de gases y los correspondientes electrodos, como así también de una placa conectada al microcontrolador elegido que se encargará de adaptar los distintos tipos de señales intervinientes en el proceso. La placa a desarrollar contendrá por un lado adaptaciones de señal de entrada al microcontrolador con el propósito de poder adquirir todos los datos de interés del proceso utilizando éste como intermediario entre los dispositivos de sensado y todos aquellos dispositivos que permitan el almacenamiento o análisis de los mismos. Un ejemplo de aplicación de lo mencionado anteriormente será la transferencia de los datos a la PC para realizar un análisis continuo y más detallado de los resultados en el tiempo utilizando instrumentación virtual mediante el software LabView. Además, la placa mencionada se encargará de adaptar las señales de control provistas por el microcontrolador para su correcta aplicación en los diferentes módulos del sistema.

Por otro lado, el microcontrolador se encargará de controlar todos los periféricos que se vayan a utilizar (Modulo Bluetooth, Control de posición de paneles solares, Modulo tarjeta SD, etc.) y será el encargado de efectuar un lazo cerrado de control de tensión para los electrodos.

Para poder cumplir con todos estos objetivos es importante que el equipo de trabajo realice un buen proceso de modularización del proyecto con el fin de obtener un trabajo más organizado y eficiente. En principio la primera tarea consistirá en realizar una investigación exhaustiva del proceso a tratar en cuestión a través de publicaciones científicas, libros, consultas a especialistas y todo tipo de medio que pueda servir como herramienta para una mejor comprensión del proceso químico involucrado, ésta etapa fue comenzada en la P.P.S. pero debido a la complejidad del proceso es menester continuar dicha investigación. Una vez realizado el paso anterior la siguiente tarea será interiorizar el dispositivo microcontrolador a utilizar de manera tal que no se presenten problemas a la hora de su efectiva aplicación en el sistema o que, de presentarse, dichos

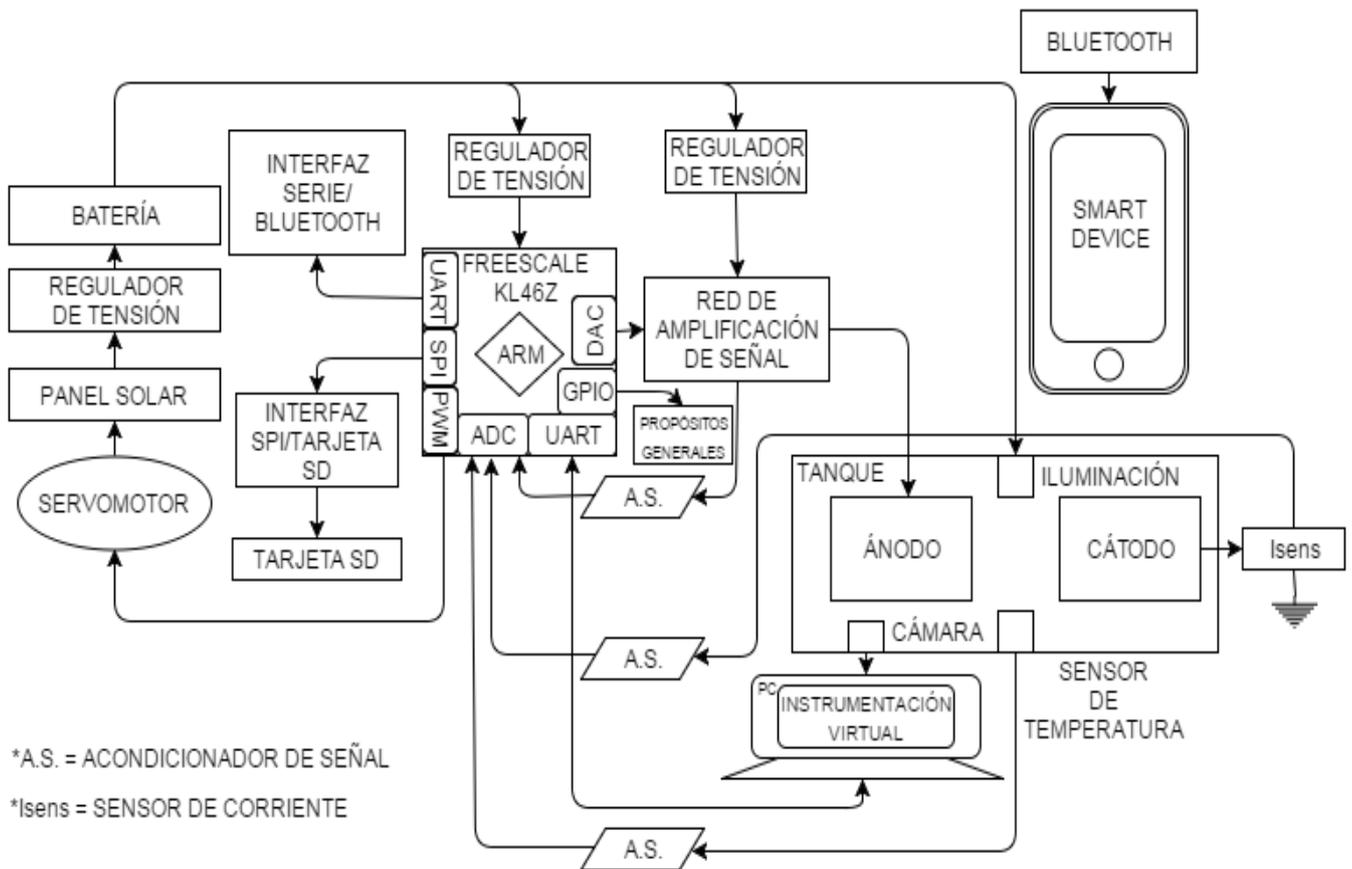
problemas puedan ser solucionados con facilidad. Lo siguiente es comenzar el desarrollo del sistema de instrumentación virtual a aplicar para el análisis de los datos, es importante que ésta tarea se de en una etapa temprana con el fin de que el mismo pueda ser optimizado con el desarrollo del proyecto aplicando un método de mejora continua en el transcurso del proyecto. Ejecutados los pasos previos es importante comenzar a diseñar todos los módulos que permitan eventualmente obtener un dispositivo autónomo a través del microcontrolador en miras de conseguir un sistema simple, efectivo y que no genere más gastos que los inherentes a su fabricación. Posteriormente se procederá a comenzar los desarrollos en hardware considerando siempre la utilización de medidas y piezas estándar a modo de facilitar la adaptación del dispositivo a otros módulos en caso de que fuese necesario. Cuando se hayan realizado todos los pasos previos lo siguiente será unificar los módulos para comenzar a realizar pruebas de campo y de laboratorio con el objetivo de analizar los datos obtenidos y eventualmente validar el sistema. Por último, se deberá realizar un plan de mejoras retroalimentando las conclusiones obtenidas con los objetivos propuestos para finalmente documentar todo el proceso de elaboración del dispositivo.

Existe cierto interés en el desarrollo aquí propuesto como un apoyo didáctico en clases de química, o materias afines. Por ello se dotará al sistema de un dispositivo de toma de imágenes que permita realizar un “*timelapse*” del proceso, con el objetivo de observar la electrólisis resumida en pocos minutos. Además, se tendrá especial cuidado en la interface gráfica en la computadora, permitiendo que un usuario con poca experiencia pueda entender las variables críticas que el sistema mide, y modificar ciertos parámetros del mismo.

Mencionaremos las materias pilares que brindaron las herramientas para realizar este proyecto integrador:

- Química aplicada
- Informática e Informática avanzada
- Probabilidad y estadística
- Tecnología Electrónica
- Electrónica Digital 1, 2 y 3
- Sistemas de Control 1 y 2
- Instrumental y mediciones electrónicas
- Síntesis de redes activas
- Electrónica Analógica 2
- Electrónica Industrial

DIAGRAMA EN BLOQUES DEL PROYECTO



ANEXO II

ETAPA	DESCRIPCION
A	Investigación y elección de insumos en base a recursos disponibles
B	Capacitación y pruebas en las plataformas de trabajo seleccionadas
C	Diseño y desarrollo del sistema utilizando instrumentación virtual
D	Diseño y desarrollo del sistema autónomo en la plataforma embebida
E	Construcción del hardware con piezas estandarizadas
F	Pruebas de campo y de laboratorio.
G	Análisis de los datos obtenidos. Validación del sistema.
H	Plan de Mejoras. Retroalimentar en base conclusiones obtenidas. Documentación final.

Anexo de Proyecto Integrador 2: Informe noviembre

Proyecto integrador - Reporte mensual

Federico Nahuel Salas - Santiago Martín Henn

Resumen—Este reporte resume los avances sobre el proyecto integrador al 28 de Noviembre de 2016. El equipo de trabajo considera que los resultados obtenidos fueron satisfactorios. Como parte de esta primer etapa se seleccionaron las plataformas de trabajo tanto en software como en hardware, por otro lado se consultó con especialistas en el área de la electroquímica y se comenzó la recopilación y estudio de publicaciones científicas conforme al objetivo del proyecto integrador. Además se realizó un curso de instrumentación virtual [1] con la finalidad de sumar herramientas útiles para el desarrollo del proyecto obteniendo buenos resultados.

I. OBJETIVOS

Los objetivos a cumplir según las etapas planteadas en la solicitud del proyecto, incluían la investigación y elección de insumos (Software y Hardware) en base a recursos disponibles, así como el comienzo de la capacitación y pruebas de las distintas plataformas de trabajo seleccionadas. Además se propuso sentar las bases para el diseño y desarrollo del sistema utilizando instrumentación virtual.

II. PLATAFORMA DE HARDWARE

Apoyandonos fuertemente en los resultados obtenidos durante la práctica profesional supervisada (P.P.S.) con un microcontrolador ARM, se seleccionó una plataforma de desarrollo de NXP denominada 'KL46Z' basada en un microcontrolador MKL46Z256VLL4MCU con un procesador de 48 MHz, 256 KB de memoria flash, y 32 KB SRAM para la memoria de programa [2]. El motivo de seleccionar dicho microcontrolador se debió a la buena experiencia obtenida en la P.P.S. mencionada en la cual se lograron apreciar las buenas características del mismo tanto en velocidad de procesamiento de datos, como así también simplicidad de utilización. Además se realizaron pruebas en un Arduino MEGA de 16 MHz de procesador, ya que el mismo presenta compatibilidad inmediata con diversos módulos de fácil acceso en el mercado (módulos SERIE, BT, SDCARD, Etc...), facilitando el estudio de los mismos, para la posterior implementación en la plataforma ARM. Éste último proceso se consideró de gran importancia para comprender en profundidad el funcionamiento de los módulos que serían utilizados de manera tal de obtener una adaptación lo más eficaz posible.

III. PLATAFORMAS DE SOFTWARE

Se seleccionó el software 'Labview' para el diseño de la plataforma en PC, software tratado en el curso de instrumentación virtual realizado. Dicho software es ampliamente utilizado por profesionales debido a su infinidad de aplicaciones posibles desde el punto de vista de la ingeniería.

Director de proyecto integrador: Dr. Ing. Julián A. Pucheta

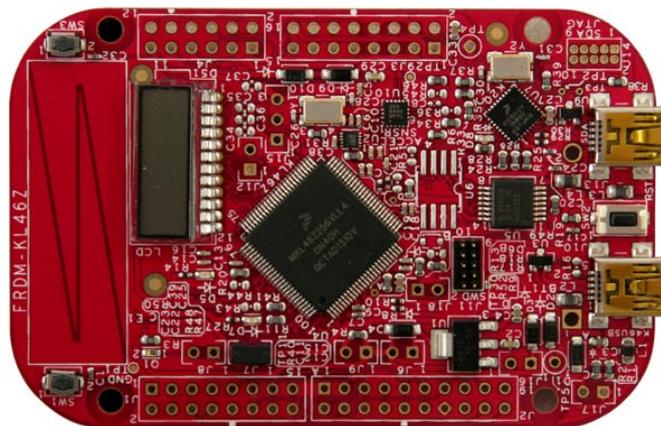


Fig. 1. Plataforma embebida KL46Z

Para la programación del microcontrolador, se utilizará el IDE de MBED [3] (El sistema operativo embebido en la plataforma de desarrollo), el cual permitió una agilidad incomparable a la hora de programar el mismo. El lenguaje elegido para el desarrollo del programa es C++. Las primeras pruebas consistieron en la elaboración de programas simples para familiarizarse tanto con el microcontrolador y todos sus periféricos, como con el programa de instrumentación virtual. En última instancia se comenzó a simular una interface serie entre el microcontrolador y la computadora, obteniendo resultados satisfactorios al transmitir y recibir datos entre ambos, proceso previamente aplicado en distintas materias durante el transcurso de la carrera y reforzado en el curso de instrumentación virtual mencionado.

IV. DOCUMENTACIÓN

Se acordó la utilización de $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ para la elaboración de los reportes mensuales y el informe final del proyecto integrador, para lo cual fue necesaria una instancia de capacitación en el sistema de documentación y versionado que este sistema permite. La plataforma elegida se denomina 'Overleaf'. El presente informe está elaborado con un estándar de la IEEE para publicaciones [4].

V. INVESTIGACIÓN SOBRE ELECTROQUÍMICA

Para comenzar con el desarrollo del proyecto fue necesaria una investigación exhaustiva referida al tema tratado en cuestión con el fin de comprender el proceso electroquímico implicado. Dicha etapa si bien fue comenzada con los inicios del proyecto se llevará a cabo a lo largo de todo el desarrollo del mismo debido a la complejidad del proceso.

En principio la investigación partió de una serie de papers provistos por el Dr. Ing. Julián A. Pucheta ([5],[6],[7],[8],

entre otros) los cuales permitieron comenzar a interiorizarse en el tema, sin embargo es importante aclarar que las bases físicas y químicas del proceso de Electrolisis aún siguen siendo estudiadas por químicos en todo el mundo.

Por otro lado se comenzaron a realizar interconsultas con especialistas en el área química, tanto Profesionales como estudiantes próximos a recibirse con el fin de eliminar determinadas dudas surgidas durante el desarrollo.

VI. CONCLUSIONES

Como conclusiones de la primer etapa del desarrollo del proyecto integrador se pueden destacar los siguientes puntos:

- Es de gran importancia realizar una amplia investigación del tema que se vaya a tratar antes de comenzar los desarrollos en software y hardware. En éste caso mas que importante fue indispensable para dar los primeros pasos.
- Se considera muy favorable aprovechar tanto las publicaciones científicas realizadas por profesionales de todas partes del mundo, como así también la vinculación personal con especialistas químicos. Ambas cosas fueron consideradas como actividades de enriquecimiento intelectual por parte del equipo de trabajo.
- Utilizar todas las herramientas técnicas disponibles (cursos, analisis de desarrollos similares previos, interconsulta con profesionales electrónicos, tutoriales técnicos de desarrolladores, etc.) logra facilitar en gran medida el desarrollo del proyecto, además de aumentar la calidad del mismo acercandolo lo mas posible a un proyecto de nivel profesional.

VII. PORCENTAJE DEL PROYECTO INTEGRADOR REALIZADO AL MOMENTO

El equipo de trabajo considera que durante el tiempo transcurrido hasta la fecha 28/11/2016 el porcentaje del proyecto integrador realizado fue igual al 20%

REFERENCIAS

- [1] M. Blasco, J.M. Lerda. Curso de capacitación y material bibliográfico para Labview. FCEFYN, 2016.
- [2] KLxx User and reference manual. *NXP - Phillips, Freescale*, ed. 2016
- [3] MBED Handbook and API documentation. *Collaborative project managed by ARM*, ed. 2016.
- [4] IEEE Transactions \LaTeX and Microsoft Word Style Files. <http://www.ieee.org/web/publications/authors/transjnl/index.html>
- [5] Electrocoagulation (EC)—science and applications *M. Yousuf A. Mollah1, Robert Schennach, Jose R. Parga2, David L. Cocke*
- [6] A REVIEW ON WATER ELECTROLYSIS *Emmanuel Zoulias1, Elli Varkarakil, Nicolaos Lymberopoulos1, Christodoulos N. Christodoulou2 and George N. Karagiorgis2* 1 Centre for Renewable Energy Sources (CRES), Pikermi, Greece 2 Frederick Research Center (FRC), Nicosia, Cyprus
- [7] An Overview of Arsenic Removal Technologies in Bangladesh and India *M. Feroze Ahmed Department of Civil Engineering Bangladesh University of Engineering Technology, Dhaka-1000, Bangladesh*
- [8] La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales *Álvaro Arango Ruíz1 Línea de investigación: Tratamiento de aguas. Grupo de Investigación Aplicada en Medio Ambiente GAMA. Semillero de Investigación en Gestión y Medio Ambiente SIGMA.*

Anexo de Proyecto Integrador 3: Informe diciembre

Proyecto integrador - Reporte mensual

Federico Nahuel Salas - Santiago Martín Henn

Resumen—Este reporte resume los avances sobre el proyecto integrador al 26 de Diciembre de 2016. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios. Se continuaron los desarrollos en software y hardware comenzados en Noviembre del año en cuestión, también se avanzó aún mas en el proceso de investigación. Por otro lado se comenzó a diseñar y desarrollar el software de instrumentación virtual a la vez que se comenzaron a realizar los primeros avances en lo que a sistema autónomo en la plataforma embebida se refiere. Como última actividad de ésta etapa se comenzó a construir el hardware con piezas estandarizadas.

I. OBJETIVOS

Los objetivos a cumplir en ésta etapa según lo que fue planteado en la solicitud de aprobación del tema del proyecto integrador, constituían dos grandes bloques. Uno de los bloques implicaba la continuación de las actividades comenzadas en la primer etapa del desarrollo, esto quiere decir, la profundización del proceso de investigación cuya finalidad fue la de llegar a comprender al menos los principios fundamentales del proceso en miras de aplicar los conocimientos en los desarrollos a efectuar, como así también la consolidación de lo aprendido durante la capacitación en las plataformas de trabajo a utilizar. El otro bloque implicaba el comienzo de nuevas actividades. Una de las cuales consistió en comenzar con el diseño del software para obtener un sistema autónomo en la plataforma embebida que permita la recolección y el almacenamiento de datos de manera independiente a la PC. En paralelo a esto como último objetivo de la etapa en cuestión se tuvo la construcción de los primeros prototipos en hardware del sistema utilizando piezas estandarizadas.

II. PROFUNDIZACIÓN DEL PROCESO DE INVESTIGACIÓN

Como fue mencionado en el reporte anterior, el proceso electroquímico implicado en un primer vistazo puede parecer de baja complejidad posee una gran cantidad de variables que influyen a la hora de desarrollar un sistema efectivo en el proceso de separación de partículas nocivas en el agua de consumo para el ser humano. Es por esto último que el proceso de investigación representó una etapa muy importante y extensa del desarrollo. Una de las actividades mas importantes que se pudieron destacar en esta etapa fue la de realizar interconsultas con especialistas químicos afianzados en el tema lo que permitió, entre otras cosas, definir con seguridad el tipo de sensor de temperatura a utilizar basandonos en lo investigado en distintos papers ([1],[2],[3], entre otros) en conjunto con lo mencionado por los especialistas, se aseguró que la velocidad del proceso era la suficientemente lenta como para dejar de lado la velocidad de sensado para priorizar la precisión en las mediciones. Además debido a la baja

velocidad del proceso se decidió también agregar una cámara que permita la adquisición de imágenes del mismo cada un determinado tiempo de modo de formar un "timelapse" y así poder apreciar su avance de manera rápida y didáctica. También como resultado del proceso de investigación se obtuvieron distintos tipos de materiales posibles para ser utilizados en los electrodos y el agregado de una válvula de escape de gases entre otras características constructivas a tener en cuenta.

A continuación se adjuntan imágenes del primer desarrollo en hardware de la celda electrolítica a utilizar:



Fig. 1. Celda electrolítica prototipo

III. PRIMEROS DESARROLLOS EN SOFTWARE

A fines de la primera etapa del proyecto realizada en el mes de Noviembre se ejecutaron, como fue mencionado en


```

AnalogIn    V_electrodos (PTB2);
AnalogIn    T_sensortemp (PTB0);

Serial      pc (USBTX, USBRX);
//////////DECLARACION DE VARIABLES//////////
float Vref=0.7; // Tension en electrodos (de prueba)
float data [10][3]={};
int contador =0, fila=0, columna=0;
int cant_filas = sizeof(data)/sizeof(data[0]);
int cant_columnas=sizeof(data[0])/sizeof(data[0][0]);
time_t seconds=time(NULL);
//////////FUNCIONES SECUNDARIAS//////////
/*          FUNCION TARJETA SD
*/
void datalogger ()
{
    mkdir("/sd", 0777);
    FILE *fp = fopen("/sd/Datalogger.txt", "w");
    fprintf(fp, "T. Electrodo[V]\t");
    fprintf(fp, "Tiempo[S]\t");
    fprintf(fp, "Temperatura[C]\r\n");

    for (fila=0; fila<cant_filas; fila++)
    {
        for (columna=0; columna<cant_columnas; columna++)
        {
            fprintf(fp, "%f\t", data[fila][columna]);
        }
        fprintf(fp, "%r\n");
    }
    fclose(fp);
}

//////////FUNCION PRINCIPAL//////////
int main ()
{
    set_time(1256729737);
    printf("Iniciando tarjeta SD...\n");
    mkdir("/sd", 0777);
    FILE *fp = fopen("/sd/Datalogger.txt", "w");
    if (fp == NULL)
    {
        error("No se pudo abrir el arch. Datalogger.txt\n");
    }
    else
    {
        printf("Tarjeta SD ok\n");
    }
    printf("T. Electrodo[V]\t");
    printf("Tiempo[S]\t");
    printf("Temperatura[C]\r\n");
    while (1)
    {
        for (fila=0; fila<cant_filas; fila++)
        {
            for (columna=0; columna<cant_columnas; columna++)
            {
                switch (columna)
                {
                    case 0:
                        data[fila][columna]=V_electrodos.read()*3.3;
                        break;
                    case 1:
                        data[fila][columna]=seconds;
                        break;
                    case 2:
                        data[fila][columna]=T_sensortemp.read()*3.3;
                        break;
                }
            }
        }
        for (fila=0; fila<cant_filas; fila++)
        {
            for (columna=0; columna<cant_columnas; columna++)
            {
                printf("%f\t", data[fila][columna]);
            }
        }
    }
}

```

```

}
printf("\n");
}
datalogger();
wait(0.5);
}
}

```

IV. SISTEMA AUTÓNOMO

Más allá de la necesidad de comunicación entre el dispositivo microcontrolador y la PC se planteó como objetivo la obtención de un sistema autónomo que permita la adquisición y almacenamiento de datos de manera independiente a una computadora, ya que existe la posibilidad de no contar con una, o que la misma sufra algún tipo de desperfecto. Para poder cumplir con este objetivo inicialmente el equipo de trabajo procedió a diseñar un software que permita adquirir datos y almacenarlos en una memoria compacta del tipo SD. Trabajando sobre un módulo provisto por el laboratorio en el cual se comenzó el proyecto (L.I.M.A.C.) se diseñó el sistema necesario, como se puede apreciar en la Fig.4

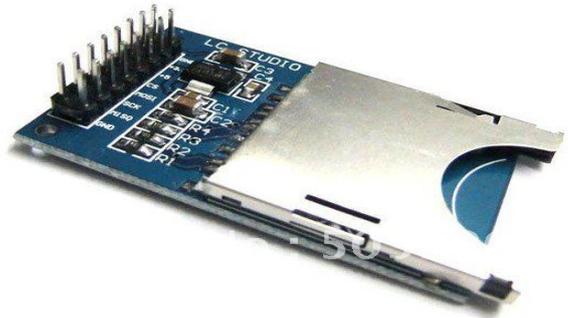


Fig. 6. Módulo para memoria SD

V. PRIMEROS DESARROLLOS EN HARDWARE

En esta etapa se comenzaron además los primeros diseños de la placa necesaria para poder ejecutar el sistema efectivamente. Si bien el microcontrolador tiene gran cantidad de utilidades las potencias que puede manejar son muy pequeñas (3.3[V], 4[mA] máximo [5]) como sucede en la gran mayoría de los microcontroladores, con lo cual para poder utilizarlo de manera satisfactoria fue necesario diseñar un circuito que permita adaptar las señales sensadas, para obtener un manejo efectivo de las mismas. El circuito diseñado en esta etapa consta de varios bloques independientes entre sí con una función específica cada uno. Entre los distintos bloques podemos mencionar: bloque de regulación de tensión, bloque de adaptación de señal para el sensado de tensión en electrodos, bloque de adaptación de señal para el sensado de temperatura, además también se dispuso un segmento de la placa para los conectores tipo banana utilizados para la conexión de los electrodos y un circuito de control para un relé. A continuación se adjuntan algunas imágenes del diseño mencionado.

En cuanto a la celda electrolítica, los materiales utilizados fueron cañerías, O-Ring's, Omegas, estándares de PVC de 110cm de diámetro. Las conexiones y valvulas están hechas con cañería de PVC de una pulgada. Con el objetivo poder visualizar el proceso, se utilizó acrílico para construir ventanas de observación. Para una tapa superior, se encargó el corte de una ventana de acrílico de 5cm de espesor, mediante láser.

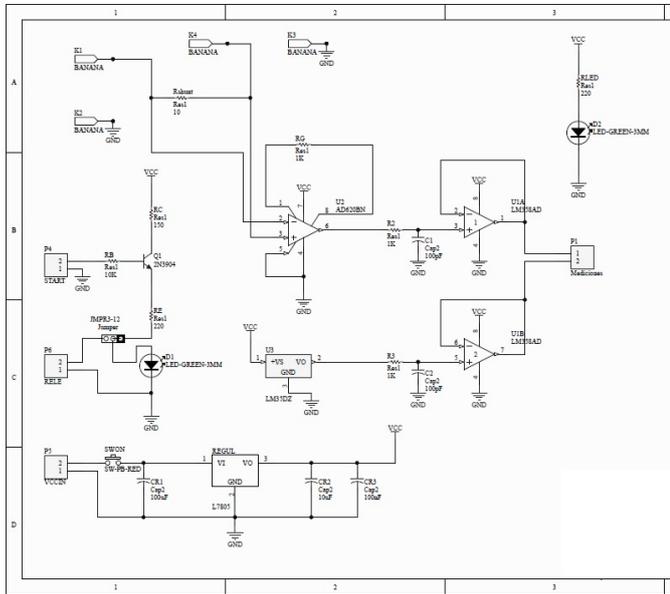


Fig. 7. Primer diseño esquemático

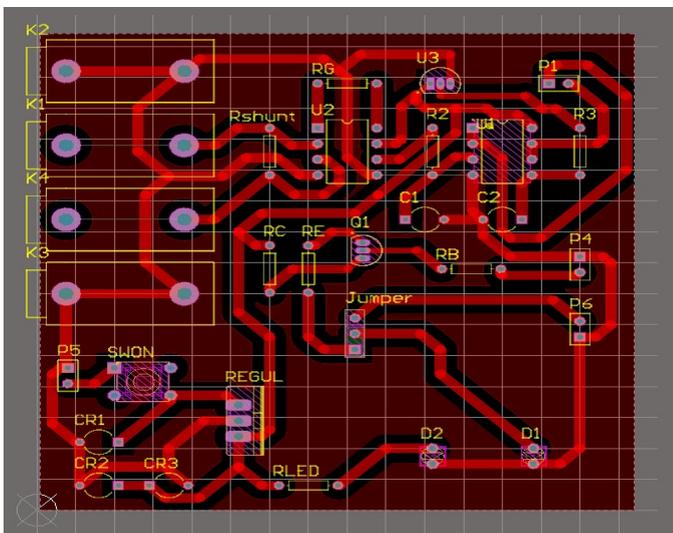


Fig. 8. Primer diseño en PCB

VI. CONCLUSION

Sobre el trabajo realizado, podemos concluir:

- Existen alternativas de materiales disponibles en el mercado como los insumos de plomería, a los cuales se les puede dar un doble uso, evitando así el diseño y construcción de estructuras propias. Fue de suma importancia

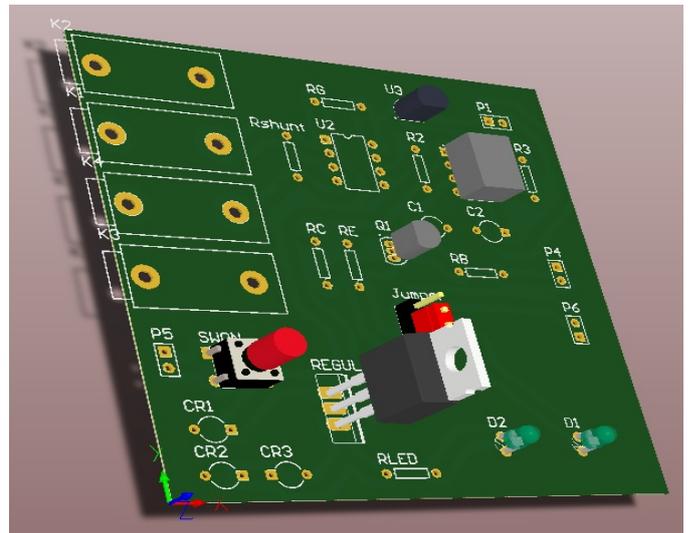


Fig. 9. Primer diseño en 3D

ingeniar una forma de reutilizar materiales como estos, en otro contexto.

- Realizar todas las pruebas que fuesen necesarias a cada modulo que conforma el software por separado, lleva a una mejor resultado final. El tratamiento de errores es muchisimo mas simple.
- Si bien los diseños presentados son prototipos iniciales, permiten probar sobre los mismos sin la preocupación de alterar un resultado final, serán de mucha utilidad para las pruebas durante todo el proyecto integrador donde el compromiso de la integridad de dichos prototipos no está presente.

VII. PORCENTAJE DEL PROYECTO INTEGRADOR REALIZADO AL MOMENTO

El equipo de trabajo considera que los avances realizados en el período que abarca el presente informe, corresponden a un porcentaje del proyecto integrador igual al 20%.

El porcentaje total de desarrollo a la fecha del presente informe sobre el total corresponde a un porcentaje del 40%.

REFERENCIAS

- [1] Characterization of Electrocoagulation for Removal of Chromium and Arsenic *Article in Chemical Engineering and Technology* · May 2005
- [2] Electrocoagulation (EC)—science and applications *M. Yousuf A. Mollah1, Robert Schennach, Jose R. Parga2, David L. Cocke*
- [3] A REVIEW ON WATER ELECTROLYSIS *Emmanuel Zoulias1, Elli Varkarakil, Nicolaos Lymberopoulos1, Christodoulos N. Christodoulou2 and George N. Karagiorgis2* 1 Centre for Renewable Energy Sources (CRES), Pikerimi, Greece 2 Frederick Research Center (FRC), Nicosia, Cyprus
- [4] M. Blasco, J.M. Lerda. Curso de capacitación y material bibliográfico para Labview. FCEFYN, 2016.
- [5] KLxx User and reference manual. *NXP - Phillips, Freescale*, ed. 2016
- [6] MBED Handbook and API documentation. *Collaborative project managed by ARM*, ed. 2016.

Anexo de Proyecto Integrador 4: Informe enero y febrero

Proyecto integrador - Reporte mensual

Federico Nahuel Salas - Santiago Martín Henn

Resumen—Este reporte resume los avances sobre el proyecto integrador realizados en los meses de Enero y Febrero de 2017. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios.

En esta etapa se continuó con las actividades comenzadas en las etapas anteriores (Noviembre y Diciembre). Una de las actividades realizadas consistió en finalizar el desarrollo del software de instrumentación virtual con el agregado de gran cantidad de funcionalidades respecto del primer prototipo, además de una drástica mejora en la interfaz de usuario. Por otro lado también se finalizó el proceso de diseño del sistema autónomo de almacenamiento de datos con resultados favorables, además se concluyó la construcción del hardware con piezas estandarizadas. Por último se comenzaron a realizar las primeras pruebas de campo para poder efectuar el análisis de los datos obtenidos con el objetivo de validar el sistema.

I. OBJETIVOS

Los objetivos de esta etapa siguen lo estipulado en la solicitud de tema para proyecto integrador aprobada, y que consiste en tres actividades fundamentales para el desarrollo del sistema: finalizar el sistema de instrumentación virtual a utilizar, concluir con el desarrollo del sistema autónomo de la plataforma embebida para la adquisición de datos independientemente de una computadora, y finalizar con la construcción del hardware (cuba electrolítica, soportes, etc...) con piezas estandarizadas. Por otro lado se comenzaron a realizar pruebas de campo con el objetivo de analizar el comportamiento inicial del sistema ejecutando la tarea para la que fue diseñado, una vez realizado esto se dio comienzo al proceso de análisis de los datos obtenidos para lograr la validación del sistema.

II. FINALIZACIÓN DEL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL

Con el avance del proyecto se fueron detectando distintas funcionalidades cuya implementación enriquecería el software de instrumentación virtual, es por ello que la conclusión del diseño del mismo representó una de las tareas de mayor duración durante el desarrollo del sistema. La elaboración de los primeros prototipos demandó mayor tiempo por más que las características iniciales de los mismos los hacían de limitada complejidad, sin embargo a medida que se fue avanzando en la curva de aprendizaje del software se lograron prototipos más complejos y de mejor calidad en menor tiempo llegando a obtener el software final a utilizar en el proyecto integrador. En las figuras 1 y 2 se puede apreciar un contraste de la interfaz de usuario del primer prototipo con la interfaz de usuario final a ser utilizada. En comparación al primer prototipo el software final de instrumentación virtual tiene mejor programación, interfaz gráfica en solapas, gráficos reorganizados, mejor diseño del software de adquisición de

imagenes para realizar el "timelapse", entre muchas otras características a mencionar.

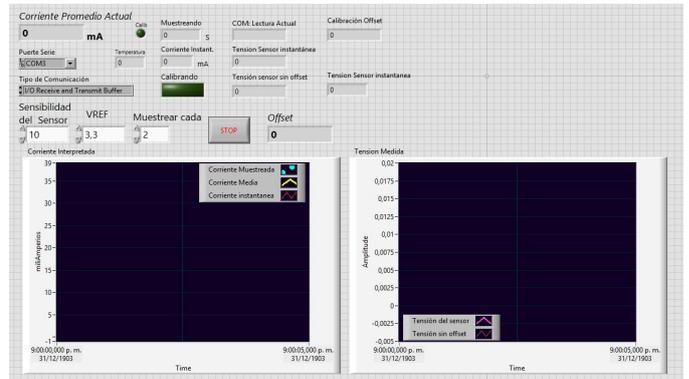


Fig. 1. Interfaz de usuario LabView, primer prototipo

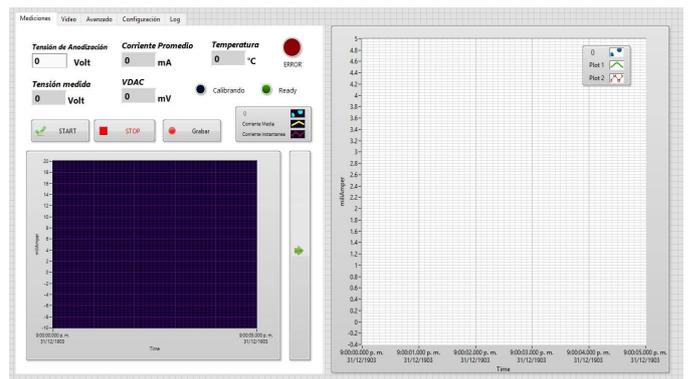


Fig. 2. Interfaz de usuario LabView final.

III. CONCLUSIÓN DEL SISTEMA AUTÓNOMO

El desarrollo tratado en este apartado fue iniciado en la etapa previa (Diciembre) partiendo de una serie de pruebas iniciales utilizando un microcontrolador Arduino de manera tal de familiarizarse con el módulo interfaz SD a utilizar. Una vez comprendido el modo de funcionamiento del módulo en su totalidad el siguiente paso sería adaptar el hardware y software utilizado hacia el microcontrolador elegido para el desarrollo del proyecto integrador (freescale KL46Z). Luego de un proceso de prueba y error junto con una gran investigación al respecto, se consiguió con éxito la adaptación correspondiente cumpliendo el objetivo de desarrollar un sistema autónomo en lo que a adquisición y almacenamiento de datos se refiere.

IV. ACABADO DEL HARDWARE

Uno de los objetivos mas importantes de la etapa aquí tratada consistió en el acabado del hardware (al menos de los componentes principales) del sistema de separación de partículas como lo son la celda electrolítica y la placa de adaptación de señales. Se deja como objetivo de una etapa posterior la finalización de la estructura necesaria para el control direccional de los paneles solares. En las imagenes (Fig.3 y Fig.4) se podrán observar las mejoras estructurales aplicadas a la celda electrolítica en comparación con el primer prototipo presentado en el último reporte. También se finalizó el desarrollo del circuito electrónico de adquisición, adaptación, y control de señales. Se fabricó un prototipo de prueba del diseño final. Se obtuvo el diagrama original de la placa de desarrollo con el objetivo de realizar el diseño de nuestro circuito respetando las dimensiones del mismo, para poder "acoplarlos" mediante conectores estándar sin utilizar cables. [3]. Luego de realizar las pruebas con la placa desarrollada inicialmente, se logró apreciar una gran cantidad de errores y elementos de diseño que podrían ser mejorados, dichos problemas se solucionaron en la placa de prueba y luego se reflejaron en el diseño de una nueva placa, la cual se fabricó y funcionó con normalidad en todas sus características. Se adjuntan entonces las fotos representativas del contraste entre el primer desarrollo de la placa y el desarrollo final a utilizar en el sistema final (Fig.5, Fig.6, Fig.7 y Fig.8). Los mismos fueron desarrollados en la plataforma de diseño Altium, y fabricados por serigrafía.



Fig. 3. Primer prototipo de celda electrolítica vs Celda electrolítica final, en vista perspectiva frontal.



Fig. 4. Primer prototipo de celda electrolítica vs Celda electrolítica final, en vista perspectiva dorsal.

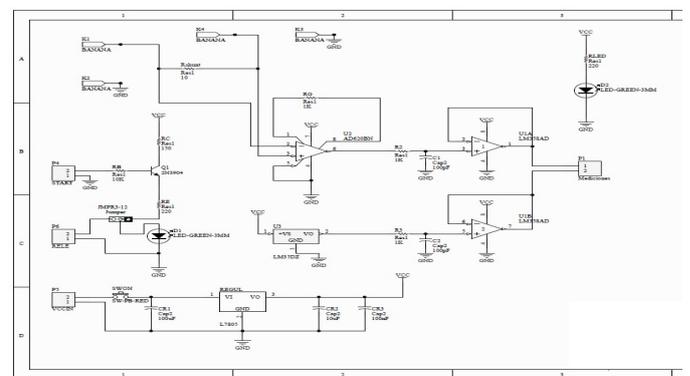


Fig. 5. Primer diseño esquemático.

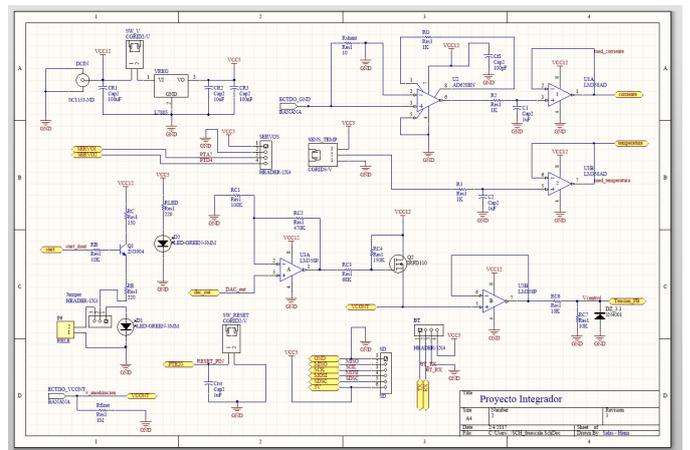


Fig. 6. Diseño esquemático final.

V. PRUEBAS DE CAMPO Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA

El último objetivo planteado consistió en comenzar con la realización de pruebas de campo del sistema con la finalidad de lograr validar las mediciones desde el punto de vista electrónico, esto quiere decir que el sistema funcione correctamente interpretando señales y efectuando control de las variables intervinientes.

La primera prueba realizada consistió en demostrar que la diferencia de potencial medida entre el ánodo y el cátodo del sistema tenía correspondencia con la d.d.p. de referencia obtenida a través de la PC (En interface con el usuario).

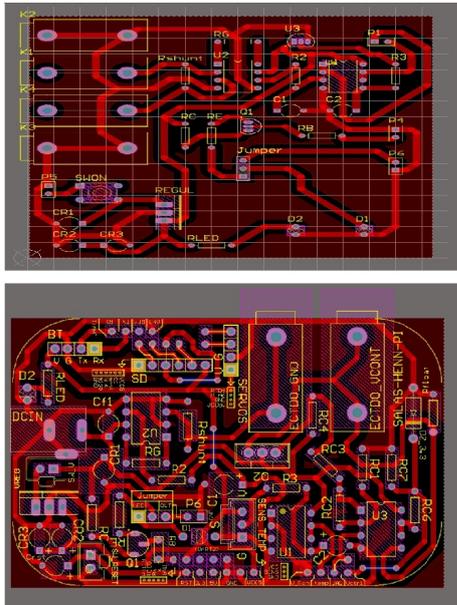


Fig. 7. Primer diseño en PCB vs Diseño final en PCB.

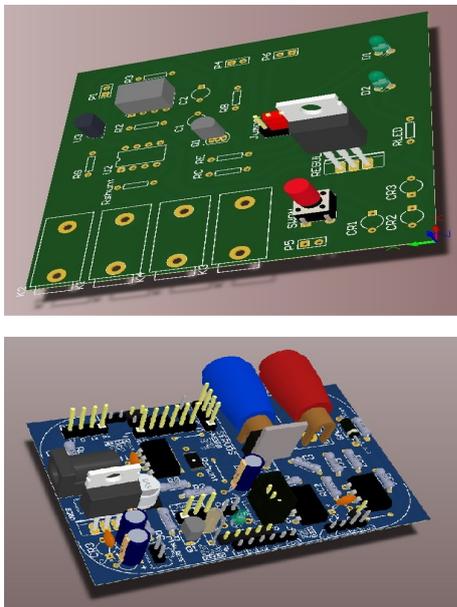


Fig. 8. Primer diseño en 3D vs Diseño final en 3D.

Para lograr el objetivo mencionado se procedió a elegir varias d.d.p., configurarlas en el sistema y medir con un multímetro dicha variable a bornes de los electrodos.

La segunda prueba se basó en la verificación del correcto funcionamiento del lazo de control de tensión, para lo cual se colocaron resistencias de distintos valores a modo de representar las impedancias características de las soluciones sujetas a electrólisis. Esto se realiza debido a que al desarrollarse el proceso de electrofloculación la impedancia del medio acuoso varía, lo que implica una modificación de la corriente circulante lo que junto con otras variables como ruido y alinealidad de los componentes, lleva a una variación de la tensión aplicada, hecho que se desea evitar a través del lazo

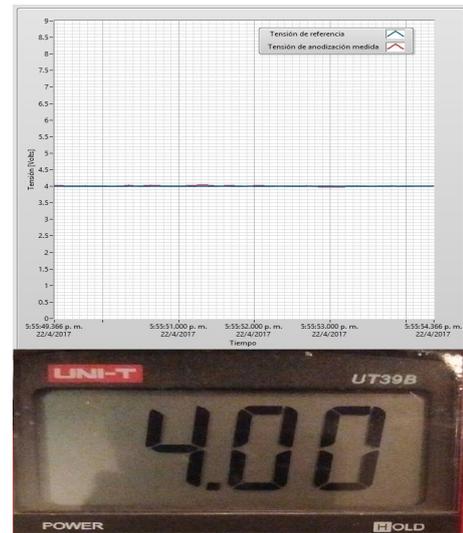


Fig. 9. D.d.p. configurada en el software de instrumentación vs D.d.p. medida entre los electrodos. Prueba a 4[V]

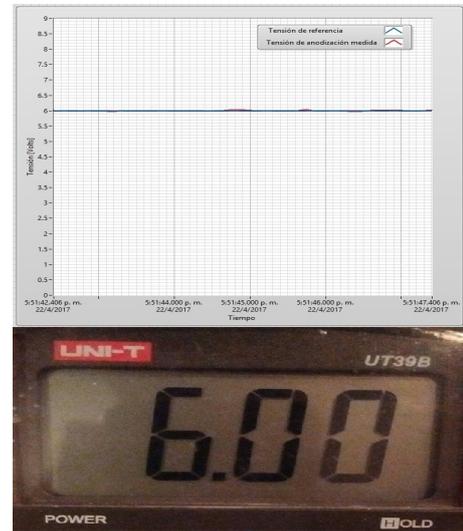


Fig. 10. D.d.p. configurada en el software de instrumentación vs D.d.p. medida entre los electrodos. Prueba a 6[V]

de control. Para la actuación en los electrodos, utilizamos un sistema basado en el control de el canal de conducción de un Mosfet, para obtener una respuesta amplificada con buenas características lineales. La señal de control varía de 0 a 3.3 Volt, y luego de algunas simulaciones medimos el sistema diseñado utilizando un mosfet IRFD110. La realimentación se realizará por software, implementando un sistema de control de primer orden ideal, pero previendo que el orden del sistema (debido a los componentes involucrados) será mayor, por lo que se esperarán comportamientos como sobrepaso o *ringing*, dependientes de la ganancia elegida.

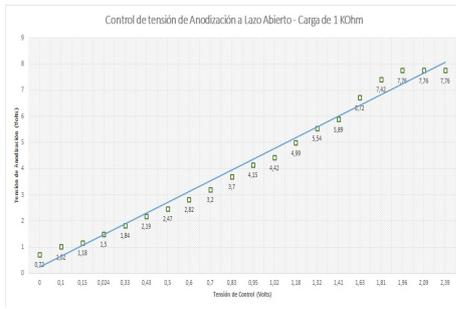


Fig. 11. Análisis de linealidad de respuesta del sistema de actuación.

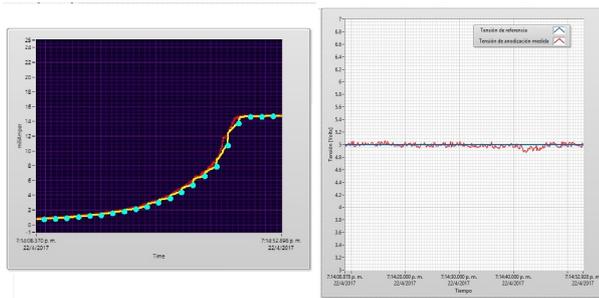


Fig. 12. Análisis de control de tensión ante variaciones de impedancia.

REFERENCIAS

- [1] KLxx User and reference manual. *NXP - Phillips, Freescale*, ed. 2016
- [2] MBED Handbook and API documentation. *Collaborative project managed by ARM*, ed. 2016.
- [3] https://github.com/igbt6/WeatherStationProject/tree/master/FRDM_46KLZ/FRDM-KL46Z_PCB_FILES/FRDM-KL46Z-PWB

VI. CONCLUSIÓN

Sobre el trabajo realizado, podemos concluir:

- Las pruebas realizadas representaron una actividad muy importante ya que se pudo demostrar los resultados del trabajo realizado hasta el momento, previamente solo basado en teoría y simulaciones.
- La obtención de diseños de calidad solo es posible a través de un proceso de mejora continua. Esto implica que de surgir alguna posibilidad de mejora no se descarta la posibilidad de un rediseño, por lo que insistimos en tener en cuenta en cada etapa del desarrollo la posibilidad de modificaciones y mejoras futuras. Concluimos que se debe poner especial detalle en la documentación, el versionado, y la asignación de recursos tanto en software como en hardware, de modo que los autores del proyecto y/o quien intervenga a futuro cuente con las herramientas necesarias para desarrollar sobre lo que ya está construido.

VII. PORCENTAJE DEL PROYECTO INTEGRADOR REALIZADO AL MOMENTO

El equipo de trabajo considera que los avances realizados en el período que abarca el presente informe, corresponden a un porcentaje del proyecto integrador igual al 30%. (10% aproximadamente en Enero, y 20% aproximadamente en Febrero)

Conformando un porcentaje total de desarrollo del 70%.

Anexo de Proyecto Integrador 5: Informe marzo

Proyecto integrador - Reporte mensual

Federico Nahuel Salas - Santiago Martín Henn

Resumen—Este reporte resume los avances sobre el proyecto integrador al 31 de Marzo de 2017. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios.

En esta etapa fueron continuadas las actividades iniciadas en etapas anteriores con el objetivo de darle conclusión a cada una de ellas.

Una de las actividades aquí tratadas consistió en la finalización del sistema de seguimiento solar planteado previamente. Además de ello se prosiguió con la etapa de validación realizando mas pruebas y analizando los datos obtenidos. A su vez se mejoraron algunos de los diseños planteados previamente, tanto en software como en hardware. Como última actividad de la etapa se empezó a plantear un plan de mejoras en base a una retroalimentación generada a partir de las conclusiones obtenidas para luego comenzar la documentación correspondiente al proyecto integrador.

I. OBJETIVOS

Los objetivos a cumplir en ésta etapa según lo que fue planteado en la solicitud de aprobación del tema del proyecto integrador, inicialmente fueron dos. El primero de ellos implicaba la conclusión de la etapa de análisis de datos obtenidos y validación del sistema, mientras que el segundo consistía en realizar un plan de mejoras para el proyecto tratado en cuestión. A pesar del planteo inicial sobre el desarrollo de las actividades a realizar presentado mediante un diagrama de Gantt, a medida que se fue desarrollando el proyecto surgieron nuevos objetivos a cumplir, esto llevó a una variación respecto del diagrama mencionado.

II. FINALIZACIÓN DEL SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR

Uno de los objetivos planteados en etapas anteriores para ser cumplido en esta fue el de finalizar la estructura para el sistema de seguimiento solar. Debido a que inicialmente se proyectó que el sistema debería tener una alternativa ecológica para la obtención de energía eléctrica se propuso la utilización de un panel solar como medio para cumplir dicho cometido, sin embargo la efectividad del mismo está completamente ligada a la perpendicularidad existente entre su plano de incidencia y el sol propiamente dicho por tal motivo se decidió desarrollar un sistema que aproveche al máximo la energía provista por el sol mediante de un sistema seguimiento de este para mantener la relación de perpendicularidad el mayor tiempo posible.

El diseño de la estructura mencionada está basado en las monturas ecuatoriales utilizadas para los telescopios astronómicos. La estructura consta de dos ejes, uno de ellos es un eje de rotación que se utiliza para ajustar la latitud de la zona donde será utilizada la estructura, y el otro es el eje sobre el cual se efectúa la rotación controlada (se utilizó un algoritmo a tal fin basado en el siguiente paper [4]) en base a la posición del sol, es decir es el eje que compensa la rotación terrestre

Director de proyecto integrador: Dr. Ing. Julián A. Pucheta

girando a la misma velocidad pero en sentido opuesto. Por lo tanto ajustando el primer eje para la latitud correspondiente y orientando la estructura de manera tal de quedar alineada con la línea imaginaria que une el Norte con el Sur al darle inicio al sistema el seguimiento solar es posible mediante un solo movimiento (Solo se necesita un servomotor).

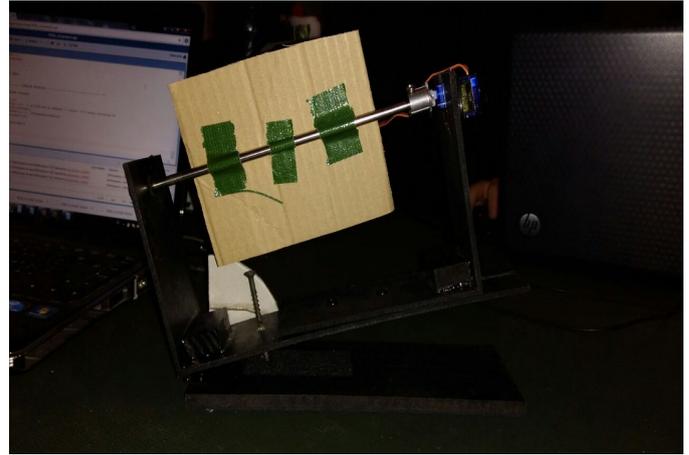


Fig. 1. Estructura para seguimiento solar.

III. VALIDACIÓN DEL SISTEMA

Otra de las actividades realizadas en esta etapa consistió en proseguir con las pruebas iniciadas en el mes anterior con el objetivo de dar validez al sistema. En este caso la actividad se basó en utilizar el sistema para el objetivo por el que fue construido, la electrofloculación, para lo cual se colocó líquido dentro de la cuba electrolítica. Una vez llena la cuba con el máximo de líquido admisible (aproximadamente 2,7 Litros) lo siguiente fue dar inicio al proceso de electrofloculación. Al comienzo del proceso se logró observar lo siguiente dentro de la cuba:



Fig. 2. Imagen al minuto 0 del proceso de electrofloculación.

Sobre el material metálico de forma circular ubicado a la izquierda (el cátodo) de la imagen se logra apreciar la

presencia de burbujas debido a la generación de Hidrógeno y sobre el otro electrodo (el ánodo) burbujas correspondientes a la generación de Oxígeno esto se produce por la destrucción de la molécula de agua debido a la circulación de corriente entre electrodos a través del fluido, en esa separación momentanea flocculan los contaminantes presentes en el líquido haciendo que dejen de ser solubles en el agua y decanten al fondo de la cuba facilitando su filtración([1],[2] y [3]). Luego de una hora de iniciado el proceso se obtuvo la siguiente imagen:



Fig. 3. Imagen al minuto 60 del proceso de electroflocculación.

A diferencia de la primer imagen sobre el cátodo ya prácticamente no se ven burbujas, esto es debido a que el material ya se encuentra anodizado. Este proceso suele usarse para "laminar" elementos metálicos como en el caso de las joyas que se utiliza un ánodo de oro y la joya a laminar como cátodo de esta manera el oro comienza a depositarse sobre la joya dándole su color característico. Observando la Figura 4 podemos ver del lado izquierdo la diferencia entre los electrodos al terminar el proceso, y del lado derecho un elemento utilizado a modo de ejemplo para demostrar que la laminación es posible con este proceso.



Fig. 4. Izquierda: Diferencia entre el Ánodo y el Cátodo de aluminio. Derecha:Elemento sometido al proceso de anodización.

En la Fig.5-Derecha se puede notar como empiezan a floccular los contaminantes, los mismos al llegar a un tamaño lo suficientemente grande se hunden quedando al fondo del recipiente.

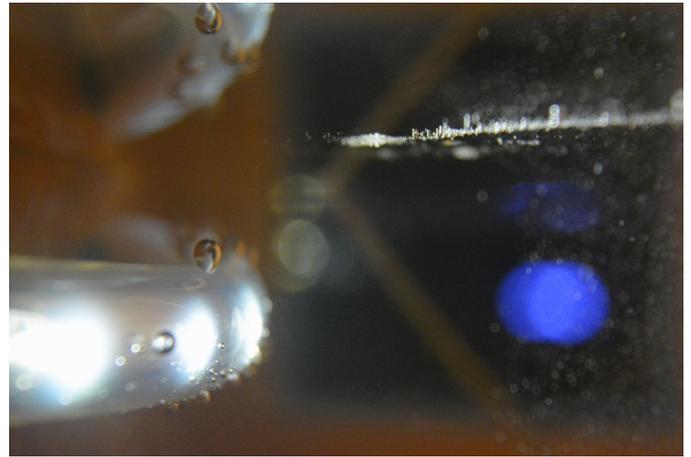


Fig. 5. Contaminantes comenzando a floccular.

Como se puede observar en las imágenes el sistema funciona realizando el proceso para el que fue diseñado, el de la electroflocculación. Una vez que el material contaminante se deposita al fondo de la celda el líquido cuya densidad de contaminantes fue disminuida es extraído de la misma mediante una válvula de vaciado.

IV. MEJORA DEL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL

El equipo de trabajo no descartó nunca la posibilidad de generar nuevas mejoras sobre los trabajos que se consideraron concluidos, es por ello que otra actividad fue la de mejorar el sistema de instrumentación virtual respecto de la ultima versión presentada en informes anteriores. A continuación podrá ser observada una serie de imágenes presentando las mejoras mencionadas. En la Fig.6 es posible ver la interface de usuario, esta cuenta con varias pestañas en el programa principal, la primera y por default, muestra los datos e indicadores más críticos. Un gráfico muestra la corriente y otro la tensión a lo largo del tiempo.

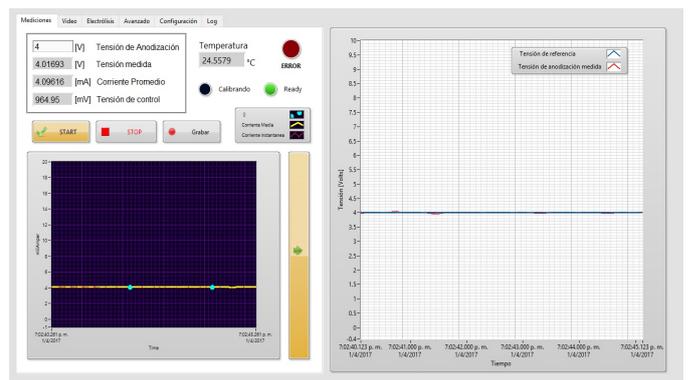


Fig. 6. Pantalla principal software de instrumentación virtual.

Si bien no hubo grandes modificaciones en cuanto a la pantalla principal se destaca una variación desde el punto de vista estético de la misma para generar un entorno mas amigable al usuario. En la Fig.7 se presenta mas en detalle

la pestaña "Video". Aquí se muestra el avance del timelapse, es decir el video generado a través de una secuencia de fotos tomadas del proceso cada un tiempo determinado. El grafico de tensión (derecha) se puede desplegar para verse en todo momento sin importar la pestaña seleccionada.

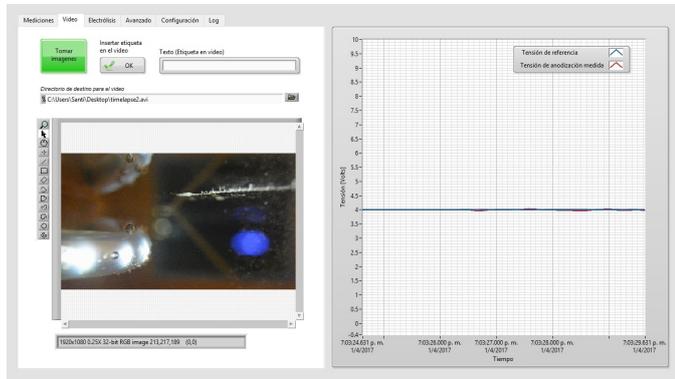


Fig. 7. Pestaña Video del software de instrumentación virtual.

La pestaña a presentar a continuación es una de las grandes mejoras realizadas en la etapa. En esta pestaña aplicando la ecuación de Faraday, un algoritmo dentro del programa integra la corriente en el tiempo y calcula la cantidad de gramos anodizados según la valencia del elemento a anodizar.

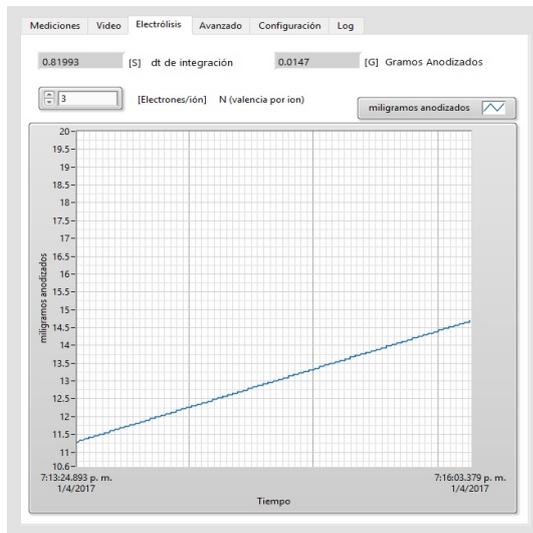


Fig. 8. Pestaña Electrólisis del software de instrumentación virtual.

De la figura 9 se puede observar la pestaña "Avanzado" en la cual si se desea es posible realizar una modificación de la variable "k" (ganancia del lazo de control de tensión) con la finalidad de cambiar la respuesta del sistema en base a los requerimientos del usuario. Es importante tener en cuenta que se requiere un conocimiento más avanzado del funcionamiento del programa para intervenir en esta configuración.

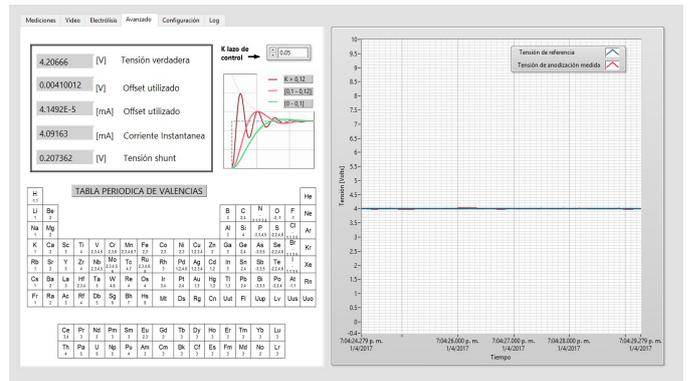


Fig. 9. Pestaña Avanzado del software de instrumentación virtual.

A modo de ejemplo se presentan algunas imágenes del impacto que puede generar en la respuesta del sistema la variación de la ganancia del lazo de tensión.

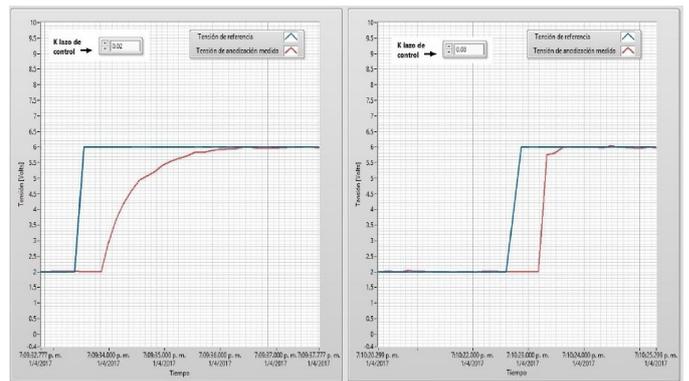


Fig. 10. Ejemplos 1 y 2-Sistema Sobre-Amortiguado.

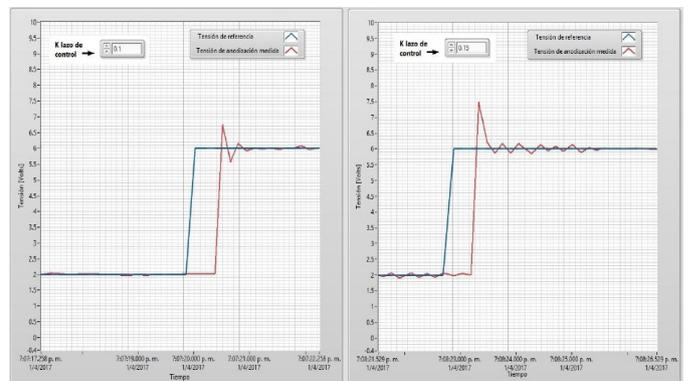


Fig. 11. Ejemplos 3 y 4-Sistema Sub-Amortiguado.

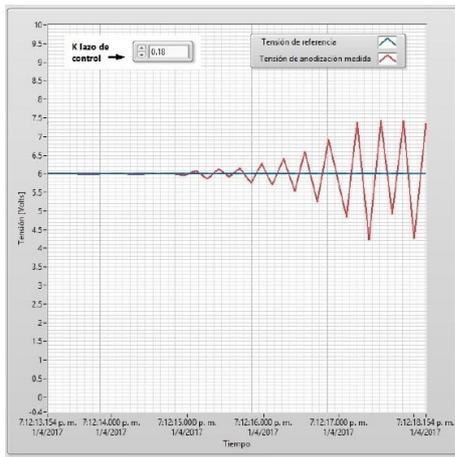


Fig. 12. Ejemplo 5-Sistema Inestable.

Es importante destacar que esta pestaña tiene grandes aplicaciones en cuanto a la didáctica para materias vinculadas a Sistemas de Control ya que simplemente con la modificación de una variable se puede demostrar en un sistema real como varían las respuestas.

Por último se presentan las pestañas "Configuración" y "Log". Pestaña Log (izquierda): Permite monitorear el desarrollo del programa, donde se presentarán mensajes referentes al desarrollo del mismo, o si existieran, que errores sucedieron y su fuente. Pestaña Configuración (derecha): Permite configurar diferentes variables claves en el programa, que necesariamente debe ingresar el usuario.

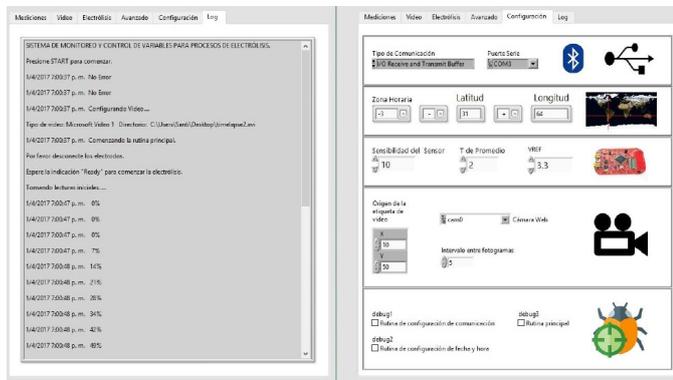


Fig. 13. Pestañas Log y Configuración del software de instrumentación virtual.

V. MEJORAS EN HARDWARE

Fueron realizadas también algunas mejoras en lo que al hardware respecta. Una de ellas consistió en la modificación del sistema de agarre de la cámara web utilizada para la realización del timelapse, el nuevo sistema permite una mayor facilidad de extracción de la cámara en caso de ser necesario. Por otro lado se agregaron interruptores y pulsadores de manera externa al gabinete (Fig.14) con el objetivo de evitar la intervención continua con partes que pudieran ser dañadas ante el contacto. A su vez fue agregado un sistema de iluminación interno para la celda (Fig.15 y Fig.16), ya que

si bien la misma posee aberturas que permiten la visión como así también el ingreso de la luz, la iluminación existente no era lo suficientemente buena para obtener buenas imágenes del desarrollo del proceso.



Fig. 14. Modificación Gabinete.

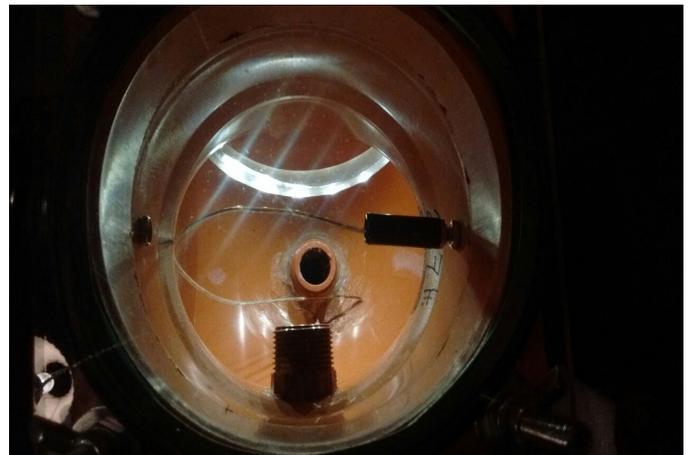


Fig. 15. Iluminación celda vista de arriba.

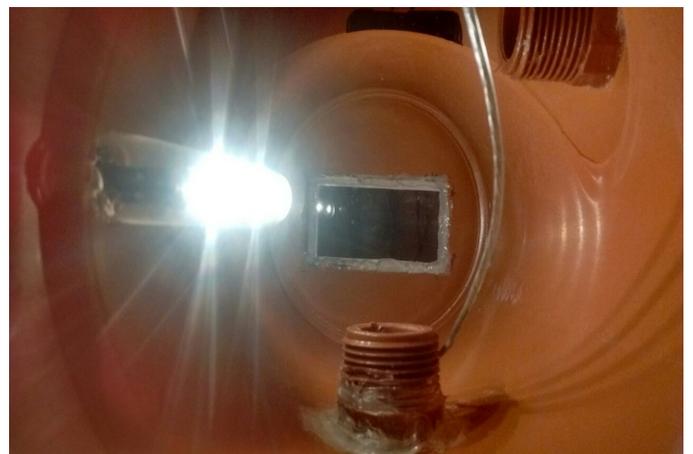


Fig. 16. Iluminación celda vista lateral.

VI. PLAN DE MEJORAS A FUTURO

Como cualquier desarrollo siempre es posible realizar mejoras a futuro en los diseños existentes, el equipo de trabajo plantea aquí algunas de ellas que podrían ser aplicadas en el proyecto integrador.

Durante el proceso de diseño fue considerado el agregado de un puerto serie mas a la placa de adaptación de señales con el objetivo de que eventualmente sea utilizado para dar funcionamiento a un módulo Wi-Fi como podría ser el módulo ESP8266 de bajo costo y fácil aplicación. Sería una actividad de baja complejidad que generaría grandes beneficios al sistema adentrandolo en el mundo del internet de las cosas (IoT).

Teniendo en cuenta que en el mundo actual un gran número de personas utilizan smartphones y tablets se podría considerar el desarrollo de una aplicación, ya que el sistema actualmente se comunica con la PC a través de una conexión inalámbrica vía Bluetooth. La aplicación podría presentar de manera simplificada lo que se puede observar en el software de instrumentación virtual, evitando así la necesidad de utilizar un PC sin tener otra alternativa.

El agregado de un sistema de carga para una batería de Litio presentaría grandes beneficios al proyecto dándole mas independencia desde el punto de vista energético debido a los grandes beneficios que presenta el Litio en cuanto a mayor duración de carga, menor tamaño (por lo tanto menor peso), mas vida útil sumado a un menor impacto ambiental que una batería de plomo.

Estas son solo algunas de las mejoras que podrían ser realizadas, se deja como labor para el informe final el agregado de otras posibles mejoras a futuro.

VII. CONCLUSIÓN

Sobre el trabajo realizado, podemos concluir:

- Las pruebas realizadas respecto al correcto funcionamiento del sistema aplicando el proceso de electrofloculación, fueron de gran importancia ya que permitieron observar de manera real el proceso electroquímico sobre el cual se basó el desarrollo del proyecto integrador.
- A través de la circulación de corriente en el líquido es posible realizar tres procesos distintos: generación de Hidrógeno y Oxígeno, laminación de un material metálico y electrofloculación.
- Consideramos una buena práctica incluir gráficos que contrasten la respuesta de referencia con la respuesta real obtenida en base a la ganancia del lazo elegida, estos no solo tienen valor didáctico, si no que permiten analizar en tiempo real los transitorios del sistema.
- En la etapa de diseño de un proyecto es importante tener en cuenta dejar disponibilidad para agregar o modificar elementos que representen una mejora para el sistema.

VIII. PORCENTAJE DEL PROYECTO INTEGRADOR REALIZADO AL MOMENTO

El equipo de trabajo considera que los avances realizados en el período que abarca el presente informe, corresponden a un porcentaje del proyecto integrador igual al 20%.

El porcentaje total de desarrollo a la fecha del presente informe sobre el total corresponde a un 90%, considerando al 10% restante como la finalización del informe final del proyecto integrador.

REFERENCIAS

- [1] Characterization of Electrocoagulation for Removal of Chromium and Arsenic *Article in Chemical Engineering and Technology* · May 2005
- [2] Electrocoagulation (EC)—science and applications *M. Yousuf A. Mollah1, Robert Schennach, Jose R. Parga2, David L. Coker*
- [3] A REVIEW ON WATER ELECTROLYSIS *Emmanuel Zoulias1, Elli Varkaraki1, Nicolaos Lymberopoulos1, Christodoulos N. Christodoulou2 and George N. Karagiorgis2* 1 Centre for Renewable Energy Sources (CRES), Pikermi, Greece 2 Frederick Research Center (FRC), Nicosia, Cyprus
- [4] Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications *Ibrahim Reda and Afshin Andreas*

Anexo de Proyecto Integrador 6: Nota de aprobación

Estimados tribunal evaluador,

Cátedra de proyecto integrador de la carrera de ingeniería electrónica

Por la presente dejo constancia que los alumnos Federico Nahuel Salas y Santiago Martín Henn han finalizado su proyecto integrador y el mismo se encuentra en condiciones de defensa.

Atentamente

