



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN
Y CONTROL**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERA ELECTRÓNICA**

**TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
ELECTROMIOGRAFÍA COMPUTARIZADA**

AUTOR: JARAMILLO FLORES CRISTINA SOLANGE

DIRECTOR: ING. FLAVIO PINEDA LÓPEZ, MSc.

SANGOLQUÍ, AGOSTO 2015

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Los potenciales bioeléctricos asociados con la actividad muscular constituyen el Electromiograma (EMG). Esos potenciales se pueden medir en la superficie del cuerpo cerca del músculo de interés o directamente en el músculo atravesando la piel con electrodos de aguja. Los electrodos del EMG recogen los potenciales de todos los músculos dentro de su alcance. La señal detectada debe pasar por un proceso de amplificación y filtrado para poder visualizarla y posteriormente analizarla.

Se ha revisado el estado del arte para analizar los trabajos relacionados con el desarrollo de prototipos de electromiografía desde el año 2003, para establecer el aporte que dará el presente proyecto a esta línea de investigación.

Cabe destacar que en los proyectos mencionados anteriormente se utilizó el lenguaje Assembler para la programación de los microcontroladores utilizados en cada uno de ellos.

En el presente proyecto el aporte que se pretenden dar al desarrollo de los equipos de electromiografía, es la incorporación de la tarjeta STM32F4 Discovery. Esta tarjeta posee un microcontrolador (STM32F4 07V6T6) de alto desempeño, de bajo costo y sencillo de usar que puede ser programado en Matlab, lo que facilita el desarrollo de aplicaciones y mejoras futuras para el prototipo. Por lo tanto, la realización del presente proyecto se justifica plenamente, ya que se diseñará un prototipo de electromiógrafo empleando modernas herramientas tanto de hardware como de software disponibles, como es el caso de la tarjeta STM32F4 Discovery, lo que generará un valor agregado en el desarrollo de las prácticas de laboratorio de los alumnos de la materia de Instrumentación Biomédica. Se desarrollará además, una interfaz gráfica para el computador utilizando el software LabView, la misma que recepta la señal y la reproduce en tiempo real.

ALCANCE DEL PROYECTO

En el actual proyecto se pretende diseñar e implementar un prototipo de un sistema de electromiografía computarizada portátil, haciendo uso de la tarjeta de adquisición de datos STM32F4 Discovery. El prototipo de electromiógrafo va a tener un canal de entrada, el mismo que estará compuesto de tres electrodos que al estar

en contacto con la superficie del músculo, recogerán las señales del mismo. El prototipo se va a comunicar con el computador por medio de un módulo Bluetooth conectado a la tarjeta de adquisición de datos por medio del cual se va a enviar la señal procesada. Se desarrollará además, una interfaz gráfica para el computador utilizando el software LabView, que recopile la señal y permita visualizarla en tiempo real. Finalmente se realizarán pruebas del funcionamiento del prototipo con pacientes control basándose en el potencial de acción de unidad motora PAUM.

OBJETIVOS

General

- Diseñar e implementar un prototipo de Sistema de Electromiografía computarizada haciendo uso de la tarjeta de adquisición de datos STM32 F4 Discovery.

Específicos

- Revisar el fundamento teórico y el estado del arte de prototipos de electromiógrafos implementados.
- Diseñar e implementar el hardware del prototipo del electromiógrafo.
- Diseñar e implementar el software del prototipo del electromiógrafo.
- Realizar pruebas de desempeño y funcionamiento del prototipo.

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE DEL PROTOTIPO

DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO

A continuación se presenta una breve descripción del hardware del prototipo:

- El sistema de electromiografía computarizada es un sistema portátil, es decir que no requiere de cables ya sea para la comunicación con el computador como para la alimentación. Por lo tanto el dispositivo es alimentado con baterías y se comunica con el computador mediante un módulo Bluetooth.
- El prototipo dispone de un canal de entrada mediante el cual se hace la recepción de las señales, este canal de entrada se compone de tres electrodos, dos bipolares y uno de referencia.
- La tarjeta para la adquisición de datos con la que se desea trabajar es la STM32F4 Discovery, que permitirá realizar el muestreo de la señal así como la etapa de filtrado de la misma. De esta manera es posible ahorrarse la implementación física de dicha etapa.

CARACTERÍSTICA DE LA SEÑAL SEMG

Los requisitos que determinan el diseño del electromiógrafo dependen de las características de la señal de SEMG. La señal SEMG es estocástica, esto quiere decir que no tiene un patrón definido sino que presenta patrones al azar. Sin embargo, se sabe que la amplitud de la señal tiene un rango de 50 μ V a 5 mV y se presenta en un rango de frecuencias de 5 a 500 Hz, encontrándose la mayor cantidad de actividad electromiografía alrededor de los 50 Hz.

DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROTOTIPO

Para realizar el diseño del prototipo se lo ha dividido en las etapas que se muestran en el diagrama de bloques de la **Error! Reference source not found.**

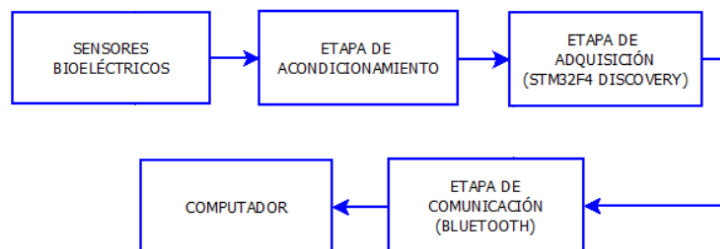


Figura 1. Diagrama de bloques del Electromiógrafo implementado.

DISEÑO DEL PROTOTIPO POR ETAPAS

Etapa de sensores bioeléctricos

- **Requisitos de los electrodos**

Tabla 1

Requisitos de los electrodos

Electrodos	
Número	3 (bipolar y referencia)
Material	Ag / AgCl
Gel	Electrolítico
Adheribles	Fuerte adhesivo
Diámetro	40 mm máximo
Conector	Redondo
Distancia entre electrodos	20 mm – 30 mm
Ubicación	Longitudinal o Transversal

- **Selección de los electrodos**

Para la selección de los electrodos se analizaron las distintas opciones existentes en el mercado, dependiendo de la casa comercial los electrodos presentan diferentes características.

Se utilizaron tres electrodos para la adquisición de las señales, el electrodo inversor, el no inversor y el de referencia. Los electrodos serán ubicados siguiendo las recomendaciones del SENIAM.

Etapa de Acondicionamiento de la señal

La etapa de acondicionamiento, a su vez, se divide en cuatro sub etapas, el diagrama de bloques que se presenta en la Figura 2 muestra la estructura interna de la etapa de acondicionamiento de la señal.



Figura 2. Diagrama de bloque de la etapa de acondicionamiento de la señal.

- **Requisitos de la etapa de Acondicionamiento**

Se estableció una ganancia total del sistema de 500 de manera que, de la señal SEMG que ingresa al sistema, que está en un rango de 50 μ V a 5mV, a la salida se obtenga una señal en un rango de 25mV a 2.5V. La ganancia se determinó utilizando los valores máximo y mínimo esperados de la señal de SEMG, al igual que los valores máximo y mínimo con los que trabaja la tarjeta STMF4 DISCOVERY. La tarjeta detecta valores desde 0.2mV hasta los 3.3V.

- **Alimentación del sistema**

La etapa de alimentación del sistema se encarga de suministrar energía al hardware del prototipo, lo que incluye amplificadores operacionales y la tarjeta de adquisición. Tomando en cuenta estos aspectos se establecieron los siguientes requisitos.

Tabla 2

Requisitos de la etapa de alimentación

Etapa de Alimentación	
Alimentación STM	5V
Alimentación amplificadores	$\pm 9V$
Alimentación circuito	Bipolar
Corriente	Continua

En cuanto a la alimentación de la tarjeta se refiere, se utilizó un regulador de voltaje L7805, que a su entrada reciba los nueve voltios provenientes de las baterías y a la salida entregue los cinco voltios que necesita la tarjeta para trabajar.

- **Pre amplificación**

La etapa de pre amplificación es la encargada de recibir las bioseñales, amplificarlas y establecer una referencia de medición para el sistema.

Tabla 3

Requisitos de la etapa de pre amplificación

Etapa de Pre amplificación	
Amplificador	Instrumentación
Impedancia de entrada	$10^9 - 10^{12}$ ohmios 2 – 10 pF
Ganancia	25
CMRR	≥ 90 dB

Se decidió trabajar con el amplificador de instrumentación INA 129 de Texas Instruments, ya que cumple con los requisitos establecidos y además está recomendado por el fabricante para instrumentación médica.

La ganancia del INA 129 está por la ecuación:

$$G = 1 + \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{R_G}$$

Donde R_G es el valor de la resistencia para fijar la ganancia deseada y G corresponde al valor de la ganancia.

En el caso del presente proyecto, se estableció una ganancia de la etapa de pre amplificación de 25, con lo que se realizaron los cálculos para obtener el valor de la resistencia R_G .

$$25 = 1 + \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{R_G} \rightarrow R_G = 2.06 \text{ k}\Omega$$

$$R_G = 2 \text{ k}\Omega$$

Para esta etapa adicionalmente se utilizó un circuito de retroalimentación de pierna derecha propuesto por el fabricante, utilizado para registrar señales de ECG. El circuito propuesto, sirve para evitar las corrientes de desbalance y para compensar problemas de ruido de modo común que se puedan presentar en la entrada diferencial del amplificador de instrumentación.

- **Integración**

El circuito integrador tiene la finalidad de disminuir el voltaje de offset a la salida del amplificador y evitar que este se sature.

Tabla 4

Requisitos de la etapa de integración

Etapa de integración	
Amplificador	Operacional de propósito general
Frecuencia de trabajo	50Hz
Entrada	Señal pre amplificada
Consumo de energía	Bajo (menor a 2mA)

Para el diseño de esta etapa, se toma en cuenta el valor de la frecuencia en la que se encuentra mayor actividad en las señales SEMG, correspondiente a 50 Hz.

$$f = \frac{1}{T} \text{ y } T = R \cdot C$$

$$\frac{1}{50} = R \cdot C = 0.02$$

De donde se obtiene aproximadamente:

$$R \cdot C = (270k\Omega) \cdot (0.1\mu F)$$

- **Amplificación**

Finalmente, a la salida del amplificador de instrumentación se tiene una última fase de amplificación mediante un amplificador operacional en configuración no inversora, que proporciona una ganancia de 20.

Tabla 5

Requisitos de la etapa de amplificación

Etapa de Amplificación	
Amplificador	Operacional de propósito general
Impedancia de entrada	Alta ($10^9 - 10^{12}$ ohmios)
Ganancia	20
CMRR	≥ 90 dB
Consumo de energía	Bajo (menor a 2mA)

Basándose en la ecuación para diseñar un amplificador en configuración no inversora se tiene:

$$G = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$20 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \rightarrow 19 = \frac{R_2}{R_1}$$

$$R_1 = 1.5k\Omega ; R_2 = 30k\Omega$$

Etapa de Adquisición de datos (STMF4 DISCOVERY)

La adquisición de los datos se realiza mediante la tarjeta STMF4 DISCOVERY, la misma que se encarga del muestreo, la conversión analógica / digital de la señal y posteriormente del filtraje de la misma.

Etapa de Comunicación

La etapa de comunicación se encarga del envío de la señal acondicionada desde la tarjeta al computador haciendo uso del protocolo de comunicación serial 802.15, que corresponde a la comunicación mediante Bluetooth.

ESQUEMA GENERAL DEL PROTOTIPO

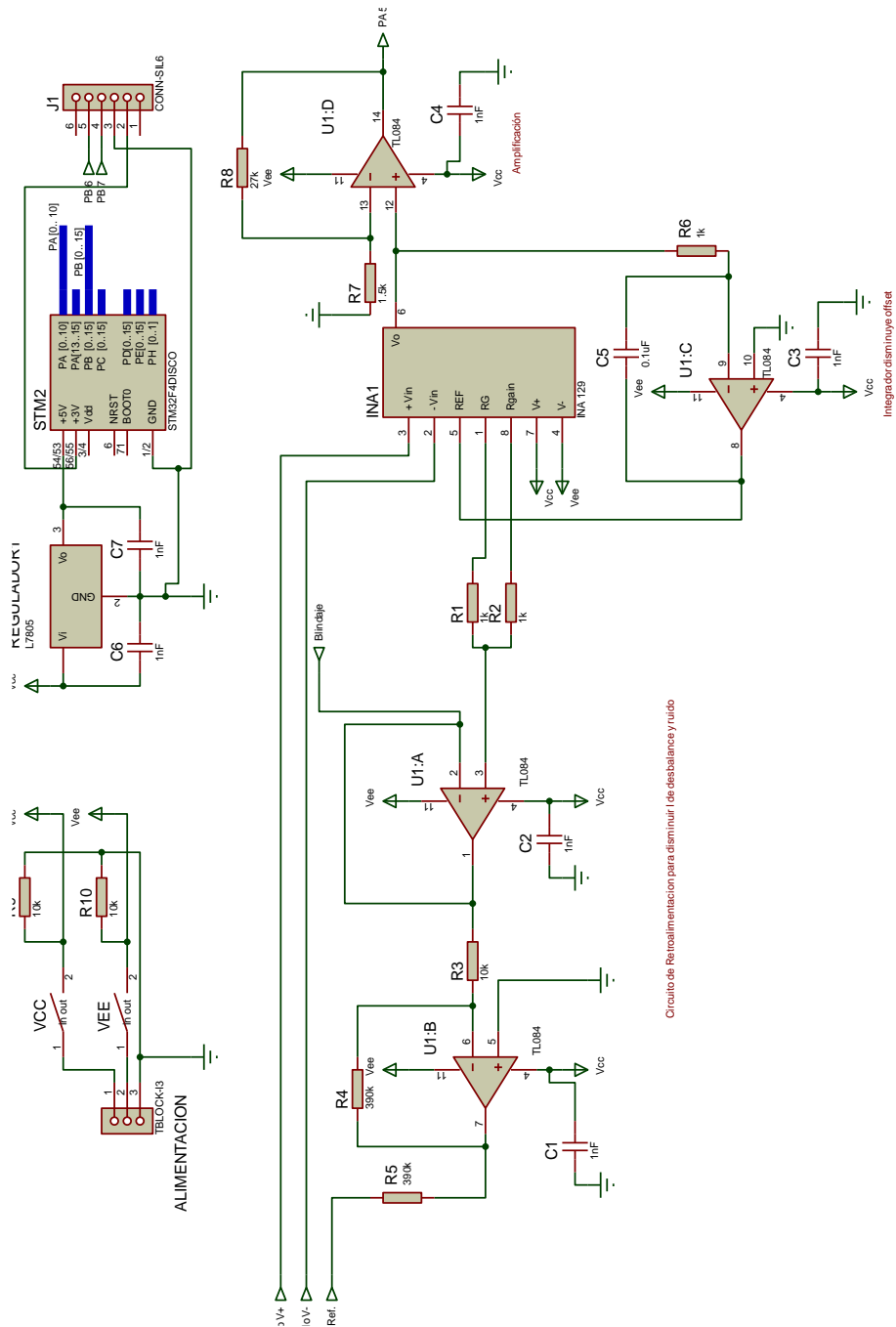


Figura 3. Diagrama general del prototipo.

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE DEL PROTOTIPO

DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE DEL PROTOTIPO

Dentro del software del prototipo se tienen dos partes principales, la programación de la tarjeta de adquisición de datos y el programa encargado de recibir la señal en el computador. Es decir que son dos programas distintos, el primero encargado de la recepción, filtrado y envío de la señal; y el segundo a cargo de la recepción de la señal y la visualización en tiempo real de la misma.

DETERMINACIÓN DE LOS REQUISITOS DE SOFTWARE

De igual manera que para los requisitos de hardware, para el software es imperativo tomar en cuenta las características de la señal SEMG con la que se va a trabajar.

- En primer lugar, se debe establecer el periodo de muestreo de la señal, la frecuencia mínima de muestreo determinada por Nyquist debe ser 1000 Hz, por lo tanto el periodo mínimo de muestreo es de 1ms.
- Además, se deben establecer las características de los filtros, como la frecuencia de corte, el tipo, el orden.
- El HMI debe ser sencillo y fácil de utilizar, al mismo tiempo que debe contener la información necesaria del paciente, la pantalla para visualizar la señal en tiempo real y las herramientas necesarias para manipular la señal en caso de ser necesario.

DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SOFTWARE DEL PROTOTIPO

El software para la adquisición de datos presenta varias etapas, la estructura del software del prototipo se presenta en el siguiente diagrama de bloques.



Figura 4. Diagrama de bloques del software del prototipo.

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE PARA LA TARJETA DE ADQUISICIÓN

La adquisición de la señal, que viene desde el hardware, se la realizó mediante la tarjeta STM32F4 Discovery, para luego pasar por una etapa de filtrado y ser enviada al computador para finalmente ser visualizada.

Adquisición de la señal

- **Requisitos para la adquisición de la señal**

Tabla 6

Requisitos de la etapa de muestreo y comunicación

Etapa de Muestreo y Comunicación	
Frecuencia de muestreo	≥ 1000 muestras / s
Programación	Simulink
Resolución del conversor	8 bits
Comunicación con PC	Serial Bluetooth

- **Desarrollo del programa de adquisición de la señal**

El proceso de adquisición de la señal consiste en la recepción de las señales generadas por los músculos y transmitida por los electrodos. Es necesario tomar en cuenta que la señal de entrada no debe sobrepasar el valor de 3V de amplitud para evitar que la tarjeta sufra daños.

Para la adquisición de la señal se utilizaron los bloques de la **Error! Reference source not found.**

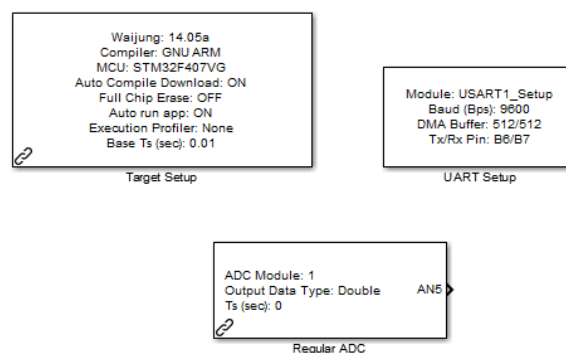


Figura 5. Programa para la Adquisición de la señal de SEMG

- El bloque de **Target Setup** sirve para seleccionar el tipo de tarjeta con el que se va a trabajar. así como la configuración del reloj interno y el periodo de muestreo.
- El bloque **Regular ADC** permite implementar el módulo de conversión análoga / digital (ADC) y configurarlo. Se debe configurar el tipo de dato que entregará el bloque en su salida, el pre escalador, el pin al cual va a entrar la señal adquirida y el periodo de muestreo.

Etapa de filtrado

Tabla 7

Requisitos de la etapa de filtrado

Etapa de Filtrado	
Tipo	Butterworth
Orden	>2
Filtro pasa alto	Fc=5 Hz
Filtro pasa bajo	Fc=500 Hz

- **Desarrollo de los filtros en el programa.**

Para esta etapa se utilizaron dos filtros en cascada con topología Butterworth cuyas características se muestran en las

Tabla 8.y Tabla 9

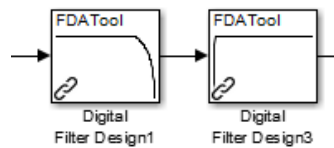


Figura 6. Filtros en cascada.

Tabla 8

Características del primer filtro

Tipo de filtro	Lowpass
Frecuencia de corte	500 Hz
Tipo	Butterworth
Orden	4

Tabla 9

Características del segundo filtro.

Tipo de filtro	Highpass
Frecuencia de corte	5 Hz
Tipo	Butterworth
Orden	4

Etapa de comunicación

Para la etapa de comunicación entre la tarjeta y el computador se utilizó un módulo Bluetooth, el cual es el encargado de enviar la señal adquirida y filtrada al computador para que esta pueda ser analizada y visualizada.

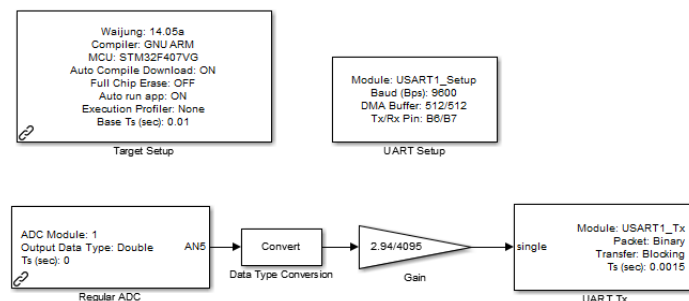


Figura 7. Programa para la comunicación entre la tarjeta y el computador.

- El bloque **USART Setup** permite configurar el módulo Bluetooth conectado a la tarjeta. Se debe establecer el número de bits, la tasa de transmisión, así como la numeración de los pines donde está conectado el módulo.
- El bloque **UART Tx** es el encargado de transmitir la señal desde la tarjeta al computador. En este bloque se configura el tipo de dato que se va a enviar y el tiempo de muestreo con el que se va a trabajar.

En la Figura 8 se puede apreciar el empaquetamiento de la señal enviada desde la tarjeta hacia el computador, se deben tener en cuenta tanto el encabezado como la terminación ya que permiten identificar la información que ingresa al computador.

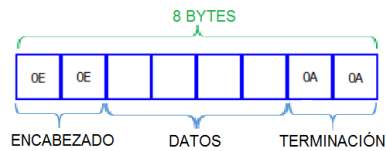


Figura 8. Empaquetamiento de la señal enviada por la tarjeta.

Es necesario utilizar un bloque *Convert*, (Figura 7) que convierte el tipo de dato de *double*, con el que trabaja Simulink, a tipo de dato *integer*, con la finalidad de que la señal sea compatible con LabView. Además, a la señal lista para ser enviada al computador se la transforma a valores de voltaje mediante una ganancia que equivale al valor de voltaje con el que trabaja la tarjeta dividido para la resolución que lee la misma en su entrada analógica.

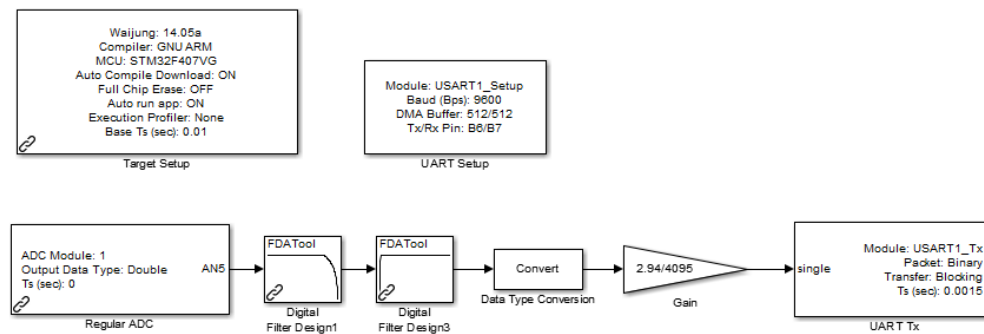


Figura 9. Programa implementado en la tarjeta STM32F4 Discovery

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE PARA LA RECEPCIÓN DE SEÑALES EN EL COMPUTADOR

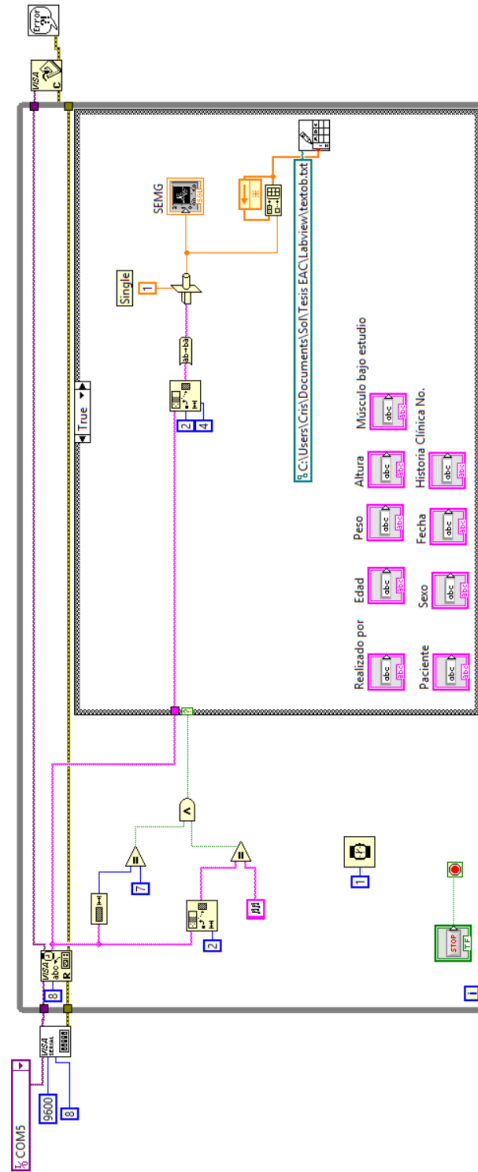


Figura 10. Diagrama general de la etapa de comunicación tarjeta-computador.

Etapa de recepción de la señal

Por motivos de sincronización, se realiza un par de comparaciones, la primera comparación se la realiza con el tamaño de los datos y la segunda comparación se encarga de contrastar los datos entrantes con la cabecera de modo que solo aquellos datos que tiene mencionada cabecera pasan a la siguiente etapa.

Finalmente, los datos recibidos en LabView son de tipo *string*, así que es necesario eliminar el encabezado y el terminal y transformar del tipo de dato string a decimal para que puedan ser visualizados.

Como característica adicional el programa cuenta con una etapa que permite guardar los valores de voltaje de la señal que ingresa en un block de notas con el nombre de textob.

Etapa de visualización

La interfaz de usuario se diseñó con el propósito de que sea sencilla de utilizar y que se presente de manera estética para el usuario. Se tomaron en cuenta los datos que se necesitan ingresar del paciente, en la parte superior se encuentran campos donde se ingresará dicha información. La pantalla consta de un visualizador en la parte central, donde se aprecia la señal SEMG en tiempo real. Es posible ampliar la imagen y regresar para analizarla por tramos de ser necesario.

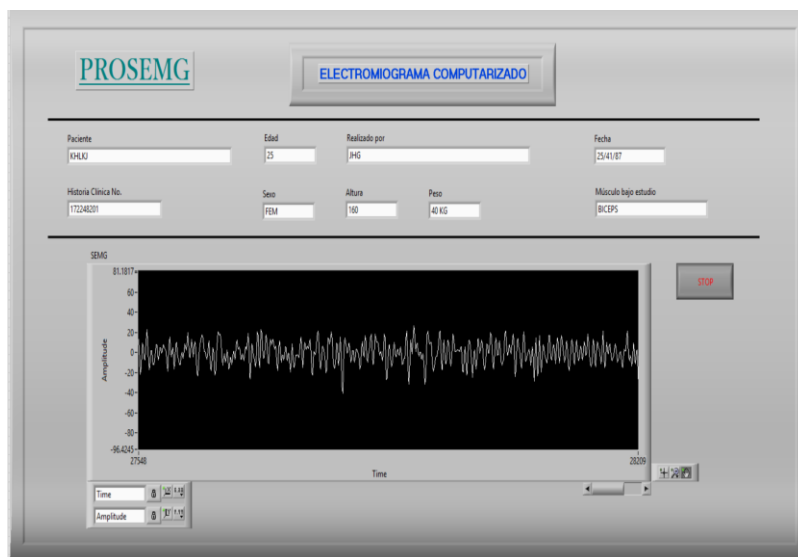


Figura 11. Interfaz de presentación de la señal SEMG al usuario.