

AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS DE CALIBRACIÓN Y CONTROL DE VELOCIDAD A TRAVÉS DEL SISTEMA EMBEBIDO BEAGLEBONE BLACK

Cynthia Katherine Vega Pérez *1, Oscar Yazit Salah García 1

1 Grupo de investigación en Fluidos y Energía GIFE. Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas. Parque Tecnológico UIS Guatiguará, km 2 vía El Refugio. Piedecuesta. Santander. Colombia.

Resumen: El laboratorio de velocidad de gases de la corporación CDT de Gas requiere que sus procesos de calibración se realicen de forma autónoma, con el fin de aumentar su eficiencia, minimizar costos y garantizar el cumplimiento de los requerimientos exigidos por el banco, por ello se diseñó e implementó una plataforma automatizada para el proceso de calibración usando el sistema embebido BeagleBone Black y un módulo de control PI (Proporcional-Integral) para el control de velocidad del aire. Como complemento, se implementó una interfaz de usuario diseñada en Qt Creator que permite al metrologo ingresar los parámetros de calibración, conocer las tendencias del proceso y obtener un registro de los valores de velocidad del instrumento patrón y el instrumento bajo calibración.

Palabras clave: Controlador PI, BeagleBone Black, Interfaz de Usuario, Calibración.

Abstract: The wind speed laboratory of Corporación CDT de Gas requires that calibration processes are carried out autonomously, in order to increase its efficiency, minimize costs and ensure compliance with the demanded by the calibration bench; therefore is designed and implemented an automated calibration process platform using the Beaglebone Black embedded system and a PI (Proportional-Integral) control module for controlling air speed. In addition, a user interface designed in Qt Creator, which allowed the metrologist to enter calibration parameters, know the trends of the process and obtain a record of the values of speed of the instrument under calibration and the pattern was implemented.

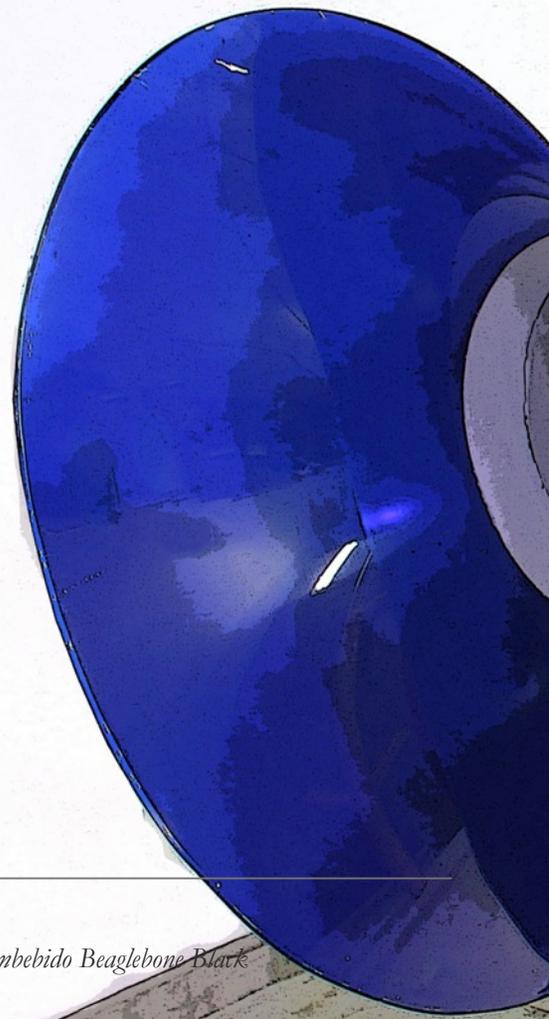
Keywords: PI Controller, Beaglebone Black, User interface, Qt Creator, Calibration

1. INTRODUCCION

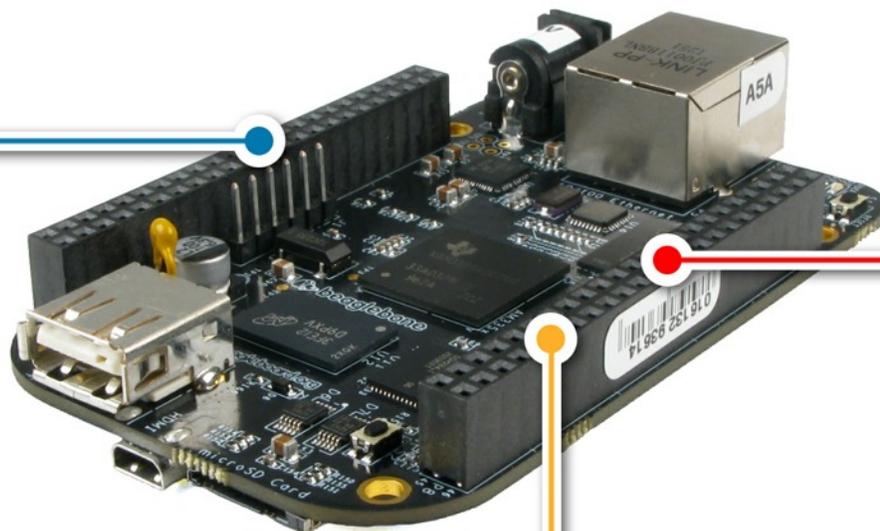
La Corporación CDT de Gas en sus laboratorios realiza determinados procesos de calibración, en los cuales el metrologo registra de manera manual los datos obtenidos en una plantilla de cálculo, para estimar su incertidumbre asociada. Debido a la importancia de obtener resultados con alta confiabilidad metrológica y garantizar la calidad de estos procesos, se plantea el uso de un sistema embebido, con el fin de automatizar dichos procesos y de diseñar e implementar un sistema de control de velocidad del aire.

Dentro del marco de acreditación del laboratorio de velocidad de gases (WSL20, Wind Speed Laboratory), se buscaba que el proceso de calibración fuera automatizado, con el fin de disminuir posibles errores del

* cvega@cdtdegas.com



C4



C2

C1

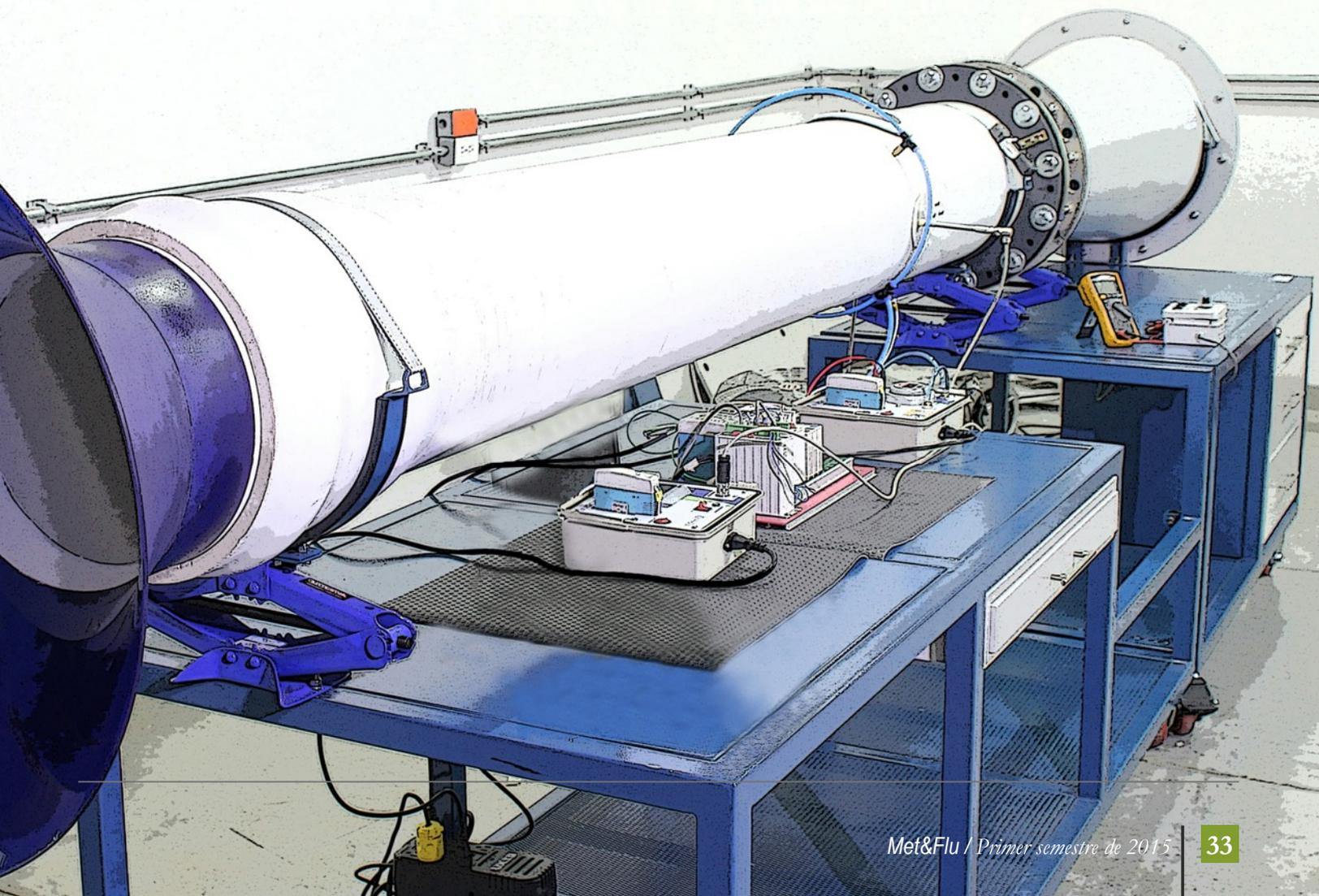




Figura 1. Metodología desarrollada para la implementación de la plataforma automatizada para el proceso de calibración.

metrólogo, mejorando así el tiempo de calibración y de generación de resultados y las condiciones de repetibilidad. Por lo tanto, la etapa de desarrollo consistió en la selección del dispositivo electrónico, planteamiento de los circuitos de adquisición de datos y su integración en una *daughterboard*. El dispositivo electrónico fue el encargado del procesamiento de las variables y de la interfaz hombre máquina (HMI).

2. METODOLOGIA

En la Figura 1 se plantea la metodología implementada, con el fin de abordar todos los parámetros fundamentales dentro del proceso de selección

Requerimientos

El sistema embebido seleccionado debe cumplir con una serie de requerimientos propios del control, adquisición y registro de datos. Las actividades

fundamentales fueron distribuidas en módulos (Ver Figura 2), las cuales se describen a continuación:

- **Interfaz de usuario:** permite el ingreso, por parte del metrólogo, de los datos requeridos en el proceso de calibración de medidores de velocidad.
- **Adquisición de datos:** Tiene el propósito de realizar el muestreo de dos señales analógicas de corriente provenientes del MM (Master Meter) y MUT (Meter Under Test), una señal analógica de tensión proveniente de un barómetro y el valor de resistencia de un detector de temperatura de resistencia (RTD) PT100.
- **Señal PWM:** señal de control del sistema de generación de flujo.
- **Sistema Embebido (Módulo central):** Sistema donde se realiza la programación de las funciones que se efectúan durante el proceso de calibración.

Además los requerimientos evaluados para la selección del dispositivo fueron:

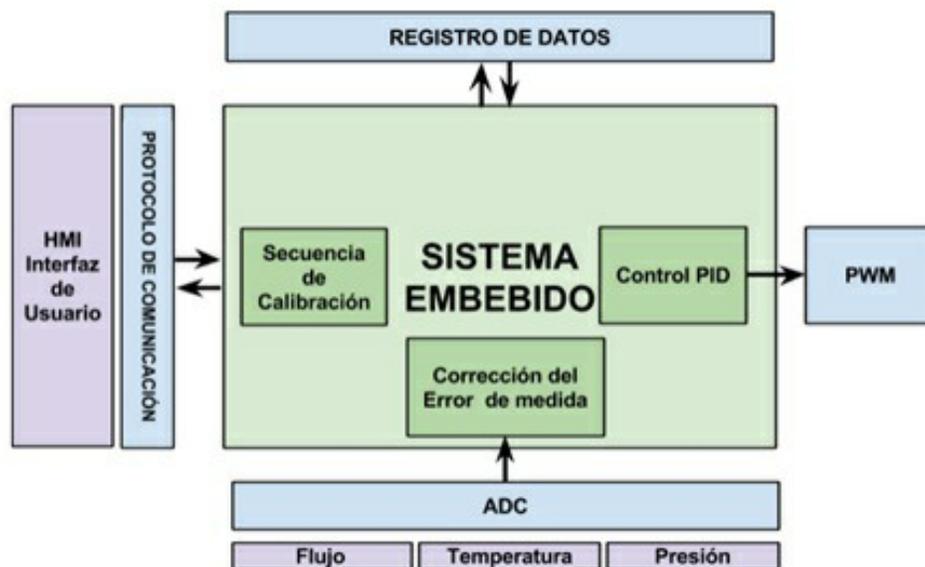


Figura 2. Módulos de control y adquisición de datos

PARAMETROS	SISTEMAS EMBEBIDOS		
	Beagle Bone Black	Beagle Board -xM	Raspberry Pi
Procesador	AM3358 ARM Cortex-A8	DM3730 ARM Cortex-A8	ARM1176JZF-S (armv6k)
Velocidad del procesador	1 GHz	1 GHz	700 MHz
Puertos análogos	7	0	0
Puertos digitales	65 (3,3 V)	53 (1,8 V)	8
Memoria	512 MB DDR3 (x16 a 800 MHz), 4 GB almacenamiento a bordo utilizando eMMC, ranura para tarjetas microSD	512MB LPDDR (333 MHz x 32), ranura para tarjetas microSD	512 MiB (modelo B)
USB	HS USB 2.0 Client Port, LS/FS/HS USB 2.0 Host Port	4 Port LS/FS/HS USB Hub, HS USB 2.0 OTG Port	1 puerto USB 2.0 2(via Hub USB integrado)
Video	microHDMI, cape add-ons	DVI-D (via connectors)	HDMI Conector RCA , HDMI (rev1.3 y 1.4), interfaz DSI para panel LCD
Audio	microHDMI, cape add-ons	3.5 mm stereo jack	Conector de 3.5 mm, HDMI
Precio [USD]	49	149	35

* V=volt, DDR3= Double Data Rate type three, LPDDR= Low Power Double Data Rate memory, MiB= mebibyte, LS/FS/HS = Low Speed/ Full Speed / High Speed.

Tabla 1. Comparación de los sistemas embebidos preseleccionados

- ❖ Posibilidad de usar un sistema operativo (Linux, Android).
- ❖ Posibilidad de conexión de una pantalla para la visualización de la plataforma de calibración.
- ❖ Salida de PWM (señal de control).
- ❖ Entradas analógicas con ADC.
- ❖ Puerto Ethernet
- ❖ Conexión de teclado y mouse.

Sistemas preseleccionados

Dado que un sistema embebido consiste en un sistema de computación cuyo hardware y software están específicamente diseñados y optimizados para resolver un problema concreto [1]. Se preseleccionaron los sistemas BeagleBone Black, BeagleBoard-xM y Raspberry Pi, con el fin de

seleccionar el sistema que cumpliera con la mayor cantidad de características y especificaciones técnicas necesarias. En la Tabla 1 [2,3] se observa la comparación de los parámetros de cada tarjeta, con el fin de determinar cuál cumple con los requerimientos planteados.

El procesador es un factor importante para determinar la velocidad de funcionamiento del sistema. Dada las especificaciones requeridas se evaluó la capacidad del procesador, dentro del cual la BeagleBone Black y la Raspberry Pi poseen procesadores de 1 GHz y 700 MHz respectivamente. Por lo tanto, se puede evidenciar que el procesador de la BeagleBone Black es más rápido. Por otra parte, una de las carencias de la tarjeta Raspberry Pi y de la BeagleBoard-xM es, sin

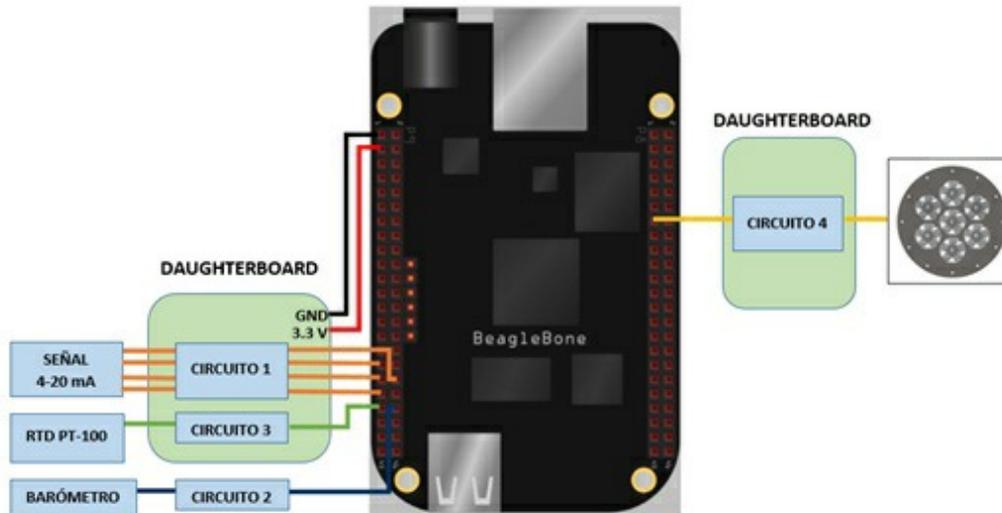


Figura 3. Conexiones de los periféricos externos a la BeagleBone black

duda, la falta de una entrada analógica. Debido a que el proceso de control está compuesto por 4 señales analógicas, la BeagleBone Black permite cumplir con esta característica, ya que posee 7 puertos analógicos y no necesita adquirir un conversor analógico-digital[3].

Teniendo en cuenta el análisis anterior y el costo de las tarjetas, se decidió escoger la BeagleBone Black para realizar el control de velocidad del aire, la interfaz de usuario, adquisición y registro de datos.

Módulo de Adquisición de Datos

En la Figura 3 se presenta el módulo de adquisición de datos, representado en un diagrama de bloques con las conexiones de la BeagleBone Black hacia los dispositivos electrónicos externos. El conjunto de las variables de entrada está conformado por: el instrumento patrón (tubo Pitot), dispositivos con salida de 4-20 mA, un barómetro y una RTD (resistance temperature detector) PT-100 y el conjunto de circuitos electrónicos para la adecuación de las señales de entrada, conformado por: el *circuito 1*, el cual, convierte una señal de corriente de 4 a 20 mA en una señal de tensión de 0 a 1.8 V; el *circuito 2*, se diseña con la finalidad de amplificar la señal de

salida del barómetro (mV) a un valor de tensión entre 0 a 1.8 V; el *circuito 3* convierte la salida de la RTD en una señal de tensión de 0 a 1.8 V (esta conversión de la señal de entrada es necesaria para usar toda la ventana de entrada del convertidor analógico digital de la Beaglebone Black) y el *circuito 4* se diseñó con el fin de generar una tensión entre 0 V y 5 V a partir de una señal PWM (pulse-width modulation), requerida para el control de los ventiladores.

CONTROL DE VELOCIDAD

Diagrama de bloques del sistema de control

Para el control de velocidad se plantea un diagrama de bloques, el cual permite caracterizar las relaciones funcionales entre los diversos componentes de un sistema de control, por medio de una representación gráfica. [4].

En la Figura 4, se ilustra el diagrama de bloques del sistema de control implementado, el cual posee una configuración básica de un sistema de control realimentado, con una sola entrada y una sola salida.

Algoritmo de Control

El algoritmo implementado para el control de velocidad, es el propuesto por el OPTOTUTORIAL: SNAP PAC PID de Opto 22 [5], el cual, está compuesto por las siguientes tres ecuaciones:

- El cálculo del error del sistema: definido como la resta de la variable del proceso (PV) y el set point, el cual es el valor de velocidad ingresado por el usuario a través de la interfaz gráfica. (Ver Ecuación 1)

$$Term_p = Error = PV - setpoint \quad (1)$$

- El término integral (Term_I) del controlador es calculado a partir de la ecuación (2). Esta ecuación relaciona el tiempo de barrido (Scan_rate), la constante integral (Tune_I), el error y el anterior término integral calculado (LastIntegral).

$$Term_I = Tune_I * Scan_rate * (LastIntegral + Error) \quad (2)$$

- La salida (Output) del controlador es definida como:

$$Output = span * Gain * (Term_p + Term_I) \quad (3)$$

Modelo Matemático de Medidores de Velocidad de Gases

Se implementó un modelo matemático para el cálculo de velocidad del aire dentro del túnel, tomando como referencia un patrón de transferencia tipo Pitot.

El tubo Pitot se conectó a un transmisor diferencial de presión, el cual tiene un rango de salida de 4 mA a 20 mA, la relación entre la corriente de salida del transmisor y la velocidad medida [6], se expresa por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\Delta P [Pa] = \frac{\Delta P_{max}}{16 mA} * (I_{\Delta P} - 4 mA) \quad (4)$$

$$V_{MM-f} [m/s] = C_p * \sqrt{\frac{\Delta P_{max} * (I_{\Delta P} - 4 [mA])}{8 [mA] * \rho_f}} \quad (5)$$

En primer lugar se realizó la conversión de corriente del transmisor a unidades de presión y posteriormente se calculó la velocidad.

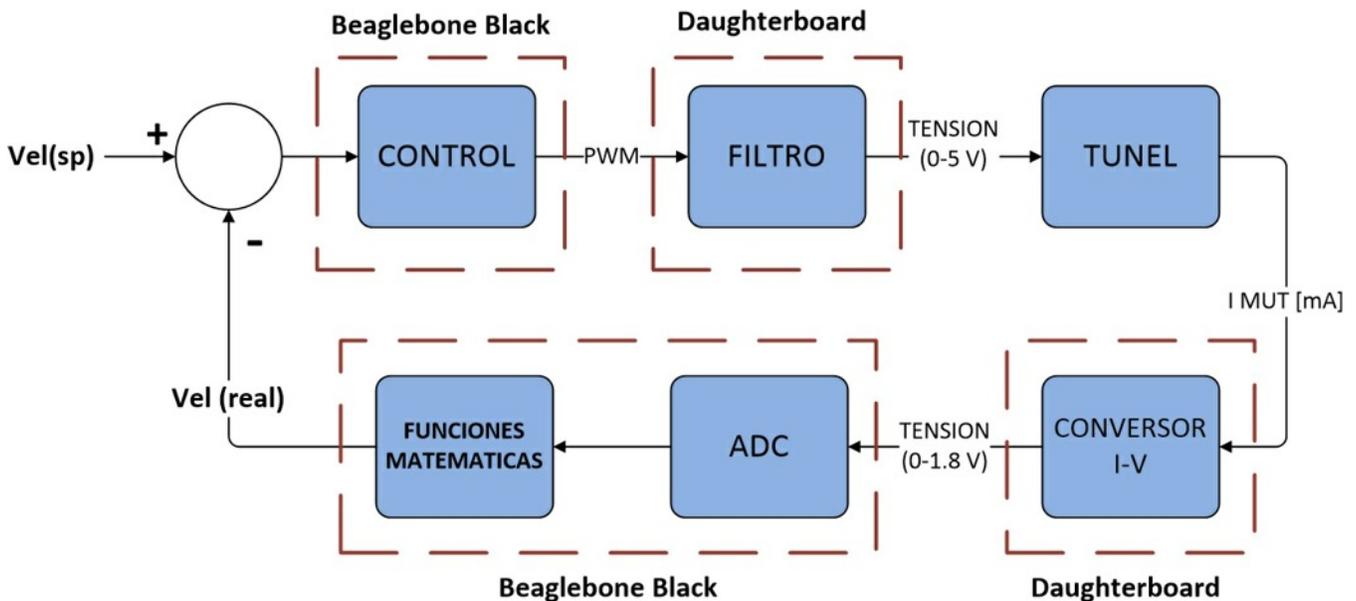


Figura 4. Diagrama de bloques del sistema de control

3. RESULTADOS

Debido a que una parte fundamental dentro del proceso de selección y diseño del sistema de control es la correcta sintonización del controlador, es decir, de la selección adecuada de sus parámetros. Es necesario identificar la dinámica del proceso que se va a controlar, por lo tanto, se requiere que el proceso sea excitado y que tanto la entrada aplicada así como la respuesta del proceso, sean registradas [7]; La técnica de identificación experimental escogida se basa en la curva de reacción del proceso (respuesta al escalón).

Con el propósito de analizar la dinámica de la planta, se diseñó una prueba experimental que consistió en el ingreso de diferentes valores para las constantes proporcional e integral del controlador. Con el fin de ajustar los parámetros de diseño requeridos, se realizó una prueba para velocidades de 5, 10, 15 y 20 m/s, en cada punto de velocidad se tomaron los datos de la señal de 4-20 mA del MUT (respuesta del proceso) y de la señal de tensión de entrada a los ventiladores (entrada aplicada).

A continuación se presenta los resultados obtenidos en donde se especifica el valor máximo, valor mínimo y el error respecto al valor máximo y mínimo, para cada conjunto de constantes propuesto (Ver Tabla 2 – Tabla 5).

A partir de esta información, se puede identificar que las combinaciones que presentan una desviación no mayor de $\pm 5\%$ del valor del set point, fueron: proporcional=0.49 e integral= 0.706.

4. DISCUSION

El propósito principal de este proyecto, es que la corporación CDT de Gas incursionara en la implementación de sistemas embebidos para el desarrollo de software. Durante el proceso se pudo identificar un aspecto por mejorar, el cual consiste en

la etapa de adquisición de datos. Esta dificultad se presenta debido a las características del ADC incorporado en la BeagleBone que son: cantidad máxima de la salida en dígitos binarios de 12 bits y un valor máximo de entrada de información de 1.8 V, por lo tanto maneja una resolución de 0.44 mV que equivale a una resolución en corriente de 0.0039 mA, la cual es alta para este tipo de procesos donde se requiere que las mediciones exactas.

5. CONCLUSIONES

- La tarjeta BEAGLEBONE BLACK fue el sistema embebido seleccionado para el control digital de velocidad del aire, debido a que su arquitectura facilita el desarrollo de aplicaciones de control e interfaz persona – máquina, gracias a la potencia de los periféricos que maneja, como la tarjeta interna de vídeo; la extensa memoria RAM, la gran velocidad de procesamiento de 1GHz y adaptación a los sistemas operativos como Ubuntu y Android basados en Linux. Es importante recalcar que el uso de esta tarjeta no se limita a este tipo de aplicaciones; puede ser implementada en aplicaciones industriales y médicas, debido a sus capacidades.
- Con la implementación del sistema embebido, la Corporación CDT de Gas incursiono en la utilización de nuevas tecnologías para el desarrollo de software que permitió la automatización del proceso de calibración en el laboratorio de velocidad de gases.
- El controlador PI (proporcional-integral) implementado, presentó un buen desempeño en todo el rango de operación del túnel de viento, principalmente en altas velocidades ya que el Tubo Pitot presenta dificultades para medir a bajas velocidades de aire, pero los resultados obtenidos cumplen con los requerimientos normativos.

	Constantes proporcional (P) e integral (I)		
	P=0,49 I=0,706	P=0,5 I=0,7	P=0,5 I=0,706
Velocidad max. (m/s)	5,12746	5,0824	5,10672
Velocidad min. (m/s)	4,83388	4,63289	4,73525
Diferencia max. (m/s)	0,12746	0,0824	0,10672
Diferencia min. (m/s)	0,26612	0,36711	0,26475
Error max. (%)	2,5492	1,648	2,1344
Error min. (%)	3,3224	7,3422	5,295

Tabla 2. Análisis de resultados (Velocidad = 5 m/s)

	Constantes proporcional (P) e integral (I)		
	P=0,49 I=0,706	P=0,5 I=0,7	P=0,5 I=0,706
Velocidad max. (m/s)	10,2085	10,1346	10,247
Velocidad min. (m/s)	9,82544	9,49553	9,79357
Diferencia max. (m/s)	0,2085	0,1346	0,247
Diferencia min. (m/s)	0,17456	0,50447	0,20643
Error max. (%)	2,085	1,346	2,47
Error min. (%)	1,7456	5,0447	2,0643

Tabla 3. Análisis de resultados (Velocidad = 10 m/s)

	Constantes proporcional (P) e integral (I)		
	P=0,49 I=0,706	P=0,5 I=0,7	P=0,5 I=0,706
Velocidad max. (m/s)	15,2416	15,1449	15,3467
Velocidad min. (m/s)	14,6913	14,5788	14,4543
Diferencia max. (m/s)	0,2416	0,1449	0,3467
Diferencia min. (m/s)	0,3087	0,4212	0,5457
Error max. (%)	1,6106667	0,966	2,31133333
Error min. (%)	2,058	2,808	3,638

Tabla 4. Análisis de resultados (Velocidad = 15 m/s)

	Constantes proporcional (P) e integral (I)		
	P=0,49 I=0,706	P=0,5 I=0,7	P=0,5 I=0,706
Velocidad max. (m/s)	20,0683	19,7992	20,0725
Velocidad min. (m/s)	19,2417	18,8469	18,8426
Diferencia max. (m/s)	0,0683	0,2008	-0,0725
Diferencia min. (m/s)	0,7583	1,1531	1,1574
Error max. (%)	0,3415	1,004	-0,3625
Error min. (%)	3,7915	5,7655	5,787

Tabla 5. Análisis de resultados (Velocidad = 20 m/s)

6. REFERENCIAS

- [1] Fundación OPTI y Fundación ASCAMM. *Tendencias y aplicaciones de los Estudio de Prospectiva Sistemas Embebidos en España; 2009.*
- [2] BeagleBoard. *Product Comparison Table.* Disponible en: <http://beagleboard.org/boards>. Accedido Julio 11,2014.
- [3] Leonards M. *Raspberry Pi vs BeagleBone Black.* Disponible en: <http://makezine.com/magazine/how-to-choose-the-right-platform-raspberry-pi-or-beaglebone-black/>. Accedido Julio 11,2014.
- [4] Cortés M, Garibay R. *DIAGRAMA A BLOQUES DE SISTEMAS DE CONTROL.* Disponible en: <http://www.biblioteca.upibi.ipn.mx/Archivos/Material%20Didactico/Apuntes%20para%20la%20asignatura%20de%20instrumentaci%C3%B3n%20y%20control/cap3.pdf>. Accedido Diciembre 7,2014.
- [5] OPTO 22. *OPTOTUTORIAL: SNAP PAC PID; 2012*
- [6] Corporación CDT de Gas. *Anexo 01 – Error de Medición de Incertidumbre del Túnel de Viento I-053; 2014.*
- [7] Universidad del Cauca. *Practica 3 – Control Regulatorio PID Serie; 2010.*
- [8] Vega C. *Práctica empresarial Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas. Tesis de Pregrado. Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia; 2015*