

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica



Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales.

Sistema de adquisición de datos y control automático de las variables físicas que influyen en el proceso de corrosión y degradación del concreto reforzado en una cámara de carbonatación acelerada

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura.

Diego Alfonso Brenes Martínez

Cartago, Junio de 2017.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

ACTA DE APROBACIÓN

**Defensa de Proyecto de Graduación
Requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica
Grado Académico de Licenciatura
Instituto Tecnológico de Costa Rica**

El Tribunal Evaluador aprueba la defensa del proyecto de graduación denominado “Sistema de adquisición de datos y control automático de las variables físicas que influyen en el proceso de corrosión y degradación del concreto reforzado en una cámara de carbonatación acelerada”, realizado por el señor Diego Alfonso Brenes Martínez y, hace constar que cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal Evaluador



Ing. Aníbal Coto Cortés

Profesor lector



Ing. Julio Stradi Granados

Profesor lector



Ing. Roberto Pereira Arroyo

Profesor asesor

Cartago, 15 Junio 2017

Declaración de autenticidad

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

En los casos en que he utilizado material bibliográfico, he procedido a indicar las fuentes mediante citas.

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

A handwritten signature in blue ink that reads "Diego Brenes". The signature is written in a cursive, slightly slanted style.

Diego Alfonso Brenes Martínez

Cédula: 3-0472-0266

Resumen

La infraestructura civil es uno de los componentes más importantes para el desarrollo de la sociedad, especialmente cuando se trata de un país que se encuentra en vías de desarrollo como el nuestro. Es por esto que el Instituto Tecnológico de Costa Rica y la escuela de Ciencia e Ingeniería de los materiales han tomado como reto la investigación del efecto que tiene la carbonatación en los materiales usados para el desarrollo de la misma, ya que estos deben de ser de la mejor calidad posible y deben resistir de forma adecuada la exposición a los elementos durante un largo periodo de tiempo. Tomando en cuenta lo anterior es crucial poder saber cómo se va a comportar un material al ser expuesto a uno de los elementos que se encuentran presentes en las vías públicas, el cual es el CO_2 . Para esto es necesario la construcción de una cámara que permita exponer muestras de cemento reforzado a concentraciones muy elevadas de CO_2 , para poder observar cual es el comportamiento de las muestras en estas condiciones. La construcción de una cámara de carbonatación acelerada tiene mucho valor, ya que no es posible observar cómo reaccionan las muestras en el medio ambiente, ya que toma el proceso toma mucho tiempo cuando se está en presencia de una baja concentración de CO_2 . Por medio de un sistema de adquisición de datos se van a obtener los valores de CO_2 , humedad relativa y temperatura, con estas variables se va a realizar un sistema de control automático, haciendo uso de válvulas de expansión electrónica para controlar el flujo de gases hacia la cámara.

Palabras clave: cemento reforzado, cámara de carbonatación acelerada, sistema de adquisición de datos, sistema de control automático, válvulas de expansión electrónica.

Abstract

Civil infrastructure is one of the most important components for the development of society, especially when it comes to a developing country such as ours. That is why the Technological Institute of Costa Rica and the School of Science and Engineering of the materials have taken as a challenge the investigation of the effect that carbonation has on the materials used for the development of the same, since these must be of the best possible quality and must adequately withstand exposure to the elements over a long period of time. Taking this into account, it is crucial to be able to know how a material will behave when exposed to one of the elements that are present on public roads, which is CO₂. For this it is necessary the construction of a chamber that allows to expose samples of reinforced cement to very high concentrations of CO₂, to be able to observe what the behavior of the samples in these conditions. The construction of an accelerated carbonation chamber is very valuable, since it is not possible to observe how the samples react in the environment, since the process takes a long time when there is a low concentration of CO₂. By means of a data acquisition system the values of CO₂, relative humidity and temperature will be obtained, with these variables an automatic control system will be developed, making use of electronic expansion valves to control the flow of gases towards the camera.

Keywords: reinforced cement, accelerated carbonation chamber, data acquisition system, automatic control system, electronic expansion valves.

*El producto de este trabajo está dedicado a mi familia,
La cual ha sido la base fundamental a lo largo de todos los años de carrera
Lograr esta meta no podría haber sido posible sin su apoyo incondicional.
Gracias por estar siempre presentes cuando necesitaba apoyo y fuerzas para seguir adelante.*

Agradecimientos

Primero quiero reiterar el agradecimiento a mi familia, por mostrar un apoyo incondicional en todos mis años de estudio, y por darme la fuerza necesaria para poder completar esta etapa de estudios superiores. También doy las gracias a Dios y a todas las personas que de una manera han estado presentes y me han brindado su ayuda en la consecución de esta meta, en especial a los profesores de la Escuela de Ingeniería Electrónica de los cuales fui alumno, gracias por la dedicación y paciencia que han demostrado tener a la hora de transmitir conocimiento.

Agradecer especialmente a los profesores Bruno Chinè y Ronald Jiménez por su constante apoyo y ayuda a lo largo de la realización del presente proyecto, sin ellos no hubiera sido posible la conclusión del mismo. También doy las gracias al profesor Roberto Pereira por su asesoría y dedicación en el periodo de tiempo sobre el cual se desarrolló este trabajo.

Finalmente agradecer a todos mis amigos y compañeros que estuvieron a lo largo de la carrera, cada uno de ellos tuvo un aporte invaluable en la conclusión de esta etapa.

¡Gracias por todo el apoyo!

Diego Alfonso Brenes Martínez.

Cartago, junio de 2017.

INDICE GENERAL

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	13
1.1 Efectos de la carbonatación en estructuras de concreto reforzado e importancia del desarrollo de un sistema de ensayos para este fenómeno.	13
1.2 Enfoque de la implementación desarrollada	14
CAPÍTULO 2: META Y OBJETIVOS	17
2.1 Meta	17
2.2 Objetivo General	17
2.3 Objetivos Específicos.....	17
CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO	19
3.1 Antecedentes bibliográficos	19
3.1.1 Ensayos de carbonatación acelerada.....	19
3.1.2 Automatización de procesos por medio de la interface LabVIEW-Arduino..	22
3.2 Principios físicos y electrónicos.....	24
3.2.1 La electroquímica de la corrosión.....	24
3.2.2 El proceso de carbonatación.....	26
3.2.3 Pruebas para determinar el frente de carbonatación.....	28
3.2.4 Medición de concentración de dióxido de carbono.....	30
3.2.5 Válvulas de expansión electrónica.....	32
3.2.6 Motores paso a paso.....	33
CAPÍTULO 4. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO.....	34
4.1 Reconocimiento y definición del problema.....	34
4.2 Obtención y análisis de información.....	35
4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de la solución.....	35
4.4 Implementación de la solución.....	36
4.5 Reevaluación y rediseño.....	37

CAPÍTULO 5. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y CONTROL AUTOMÁTICO DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN UNA CAMARA DE CARBONATACIÓN ACELERADA , DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN.....	38
5.1 Análisis de solución final para el sistema	38
5.1.1 Propuesta de solución final.....	38
5.2 Descripción del hardware	42
5.2.1 Sensor de dióxido de carbono.....	42
5.2.2 Válvula de expansión electrónica.	44
5.2.3 Driver para motores a pasos unipolares.	46
5.3 Descripción del software	47
5.3.1 Protocolo de comunicación para el sensor de dióxido de carbono	48
5.3.2 Protocolo de escritura para el Arduino.....	53
5.3.4 Interfaz de representación gráfica y recolección de datos	54
5.3.4 Control de la válvula de expansión electrónica	56
CAPITULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	59
6.1 Resultados.....	59
6.2 Análisis	66
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	70
7.1 Conclusiones	70
7.2 Recomendaciones	71
BIBLIOGRAFÍA	72
APÉNDICES	77
ANEXOS.....	79

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Estructura final del sistema de control para la cámara.	16
Figura 3.1 Estructura básica de una cámara de carbonatación.	21
Figura 3.2 Interfaz gráfica desarrollada para el sistema de control de agua.	23
Figura 3.3 Estructura básica de una celda electroquímica.	25
Figura 3.4 Esquema del proceso inicial de carbonatación.....	27
Figura 3.5 Comportamiento de la carbonatación según contenido del poro..	28
Figura 3.6 Cilindros de concreto rociados con fenolftaleína al 1%..	29
Figura 3.7 Sensor de detección por NDIR. Obtenido de [20]	30
Figura 5.1 Distribución de pines del motor a pasos unipolar.	45
Figura 5.2 Conexión de motor a pasos en el driver.....	47
Figura 5.3 Máquina de estados para protocolo de comunicación.	48
Figura 5.4 Estado inicial para comunicación con el sensor de CO ₂	49
Figura 5.5 Estado de espera para comunicación con el sensor de CO ₂	49
Figura 5.6 Estado de espera de repuesta del sensor de CO ₂	50
Figura 5.7 Estado de solicitud de valor de CO ₂	51
Figura 5.8 Estado de lectura de valor de CO ₂	51
Figura 5.9 Estado final de espera.	52
Figura 5.10 Estado de espera inicial de comunicación con el Arduino.	53
Figura 5.11 Estado de escrita hacia el Arduino.	53
Figura 5.12 Función para graficar y escribir datos en una hoja de Excel.	55
Figura 5.13 Interfaz gráfica del sistema de carbonatación	56
Figura 5.14 Configuración del driver desde el Arduino	57
Figura 5.15 Control de la válvula desde el Arduino	58
Figura 6.1 Interfaz gráfica del sistema durante una medición.....	59
Figura 6.2 Resultados de prueba de humedad de 28 horas.....	60
Figura 6.3 Resultados de dióxido de carbono con dos sistemas diferentes.....	61
Figura 6.4 Resultados de temperatura con dos sistemas diferentes	62
Figura 6.5 Resultados de humedad relativa con dos sistemas diferentes	63

Figura 6.6 Resultados de ensayo controlado de dióxido de carbono.	64
Figura 6.7 Resultados de ensayo de carbonatación.	65
Figura B.2.1 Fotografía de la cámara de carbonatación.	85

INDICE DE TABLAS

Tabla 5.1 Instrucciones para comunicación UART con el sensor K33-BLG.....	43
Tabla 5.2 Valores de resistencia entre los pines del motor unipolar.	45
Tabla 6.1. Valores promedio de porcentajes de error.....	63
Tabla B.1.1 Datos de medición de ensayo de 28 horas.	79
Tabla B.1.2 Mediciones de porcentaje de error para cada variable medida por el sistema.....	80
Tabla B.1.3 Mediciones de dióxido de carbono durante ensayo con concentración definida ..	82
Tabla B.1.4 Mediciones de dióxido de carbono durante ensayo de carbonatación	84

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

En esta sección se expone el problema de manera concreta, se menciona cual es el entorno en el cual este está inmerso y la importancia que tiene lograr resolverlo. Además, se le da un enfoque al problema de forma global y se consideran cuáles son los requerimientos de un posible sistema que dé una solución. Posteriormente se hace una introducción de la solución seleccionada para el problema.

1.1 Efectos de la carbonatación en estructuras de concreto reforzado e importancia del desarrollo de un sistema de ensayos para este fenómeno.

La construcción de infraestructura civil y en especial la infraestructura vial tiene un gran peso en el desarrollo de las sociedades, especialmente si se trata de la sociedad en países que están en vías de desarrollo. Debido a esto es de vital importancia que los materiales que se usen en el desarrollo de esta infraestructura sean resistentes y se mantengan funcionales durante largos periodos de tiempo. Uno de los principales componentes para la construcción de infraestructura es el concreto, especialmente el concreto reforzado, este debido a su composición puede verse afectado al largo plazo por altas concentraciones de CO₂. Solo en los Estados Unidos de América se calcula un costo de 300 000 millones de dólares por fallas en la infraestructura, de la misma forma se calcula que es posible evitar pérdidas por alrededor de 100 000 millones de dólares tomando medidas preventivas contra la corrosión [1].

Es por este motivo que la construcción de una cámara de carbonatación acelerada cobra importancia, ya que con esta es posible observar en un tiempo corto el efecto que tiene el dióxido de carbono solo el concreto reforzado, estos efectos no son observables en el medio ambiente debido a que las reacciones toman mucho tiempo en darse.

Es por esto que la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los materiales y la Escuela de Ingeniería en Construcción tomaron en sus manos el desarrollo de una cámara para poder hacer pruebas de carbonatación acelerada, es decir hacer pruebas en un ambiente con un valor de dióxido de carbono determinado durante un periodo largo de tiempo. Este sistema va a ser de gran utilidad para poder realizar pruebas a distintas muestras de concreto reforzado y así poder observar claramente cuál es el efecto que tiene sobre estas una concentración alta de dióxido de carbono, además es importante poder hacer un monitoreo de otras dos variables, las cuales son la temperatura y humedad relativa, estas dos variables son importantes para poder hacer un análisis de comportamiento de las muestras en condiciones específicas.

Es importante lograr un sistema que permita hacer pruebas de carbonatación acelerada debido a que este proceso es él puede causar corrosión en la armadura del concreto reforzado, en este momento no existe equipo que permita realizar este tipo de ensayos, por esta a razón es que se decide realizar la construcción de la cámara desde su base. Gracias a esto se tiene libertad de poder diseñar el sistema de forma que este sea versátil y permita hacer distintos tipos de pruebas.

1.2 Enfoque de la implementación desarrollada

Como se mencionó previamente, en la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los materiales, no existe ningún equipo que permita hacer este tipo de ensayos, es por esto que para dar solución a este problema, y específicamente para dar solución al sistema de control que se desea, se tomaron en cuenta varias opciones, y la descrita a continuación es la que presentó mayores ventajas a la hora de la implementación.

Antes de hacer una explicación del diseño del sistema de control, se definieron una serie de requerimientos mínimos para la cámara funcione de forma adecuada y permita hacer distintos tipos de ensayos, estos se pueden resumir en los siguientes:

- a. El sistema debe de ser capaz de controlar el flujo de CO_2 y de aire comprimido que se deja entrar a la cámara, ya que el fenómeno de carbonatación se da debido al valor porcentual que tengan los gases, principalmente el CO_2

- b. El sistema de adquisición de datos debe de ser capaz de obtener valores exactos de las variables involucradas en el proceso de la carbonatación, las cuales son CO₂, humedad relativa y temperatura.
- c. El sistema debe de tener una interfaz gráfica, que permita monitorear los valores inmediatos de las variables, y que permita observar los valores de estar a lo largo de un periodo de tiempo.
- d. La interfaz gráfica realizada debe de permitir que el usuario ingrese el valor de CO₂ deseado y además el tiempo de muestreo que se desea para el funcionamiento del sistema.

Tomando en cuenta los puntos previos, los cuales delimitan la solución que se va a implementar, es posible dar primero una descripción general del sistema para posteriormente describir su funcionamiento de forma más específica. La plataforma para el desarrollo de esta solución será el software NI LabVIEW, se decide hacer uso de este software en específico ya que el laboratorio cuenta con una licencia para investigación, además este presenta una variedad de herramientas útiles para poder realizar una interfaz gráfica que sea completamente funcional y eficiente.

Como primer paso se debe de hacer un protocolo de comunicación entre el software LabVIEW, y el sensor de K-33 BLG el cual se encarga de la medición CO₂, humedad relativa y temperatura. El programa desarrollado debe de tener la capacidad de mostrar el último valor obtenido y además hacer una gráfica con los valores que se han leído a lo largo del tiempo. Estos valores deben de ser guardados en una hoja de Excel, para su uso posterior en caso de ser necesario.

Posteriormente se deben de tomar los datos de CO₂ y de humedad relativa y enviarlos al microcontrolador para que este en encargo de abrir y cerrar las válvulas de expansión electrónica que controlan el paso de los gases hacia la cámara. El funcionamiento de estas válvulas se basa en motores a paso unipolares, los cuales controlan la apertura de la aguja interna de las válvulas. Para poder controlar estos motores, se hace uso de un driver el cual tiene capacidad para manejar hasta dos motores a pasos.

Una vez que se realizar el ajuste de los flujos que van hacia la cámara, se hace una nueva lectura de los valores de dióxido de carbono, humedad relativa y temperatura, y se vuelve a hacer el envío de estos datos para el control de las válvulas de expansión electrónica, la solución descrita se puede observar en la Figura 1.1 en forma de diagrama.

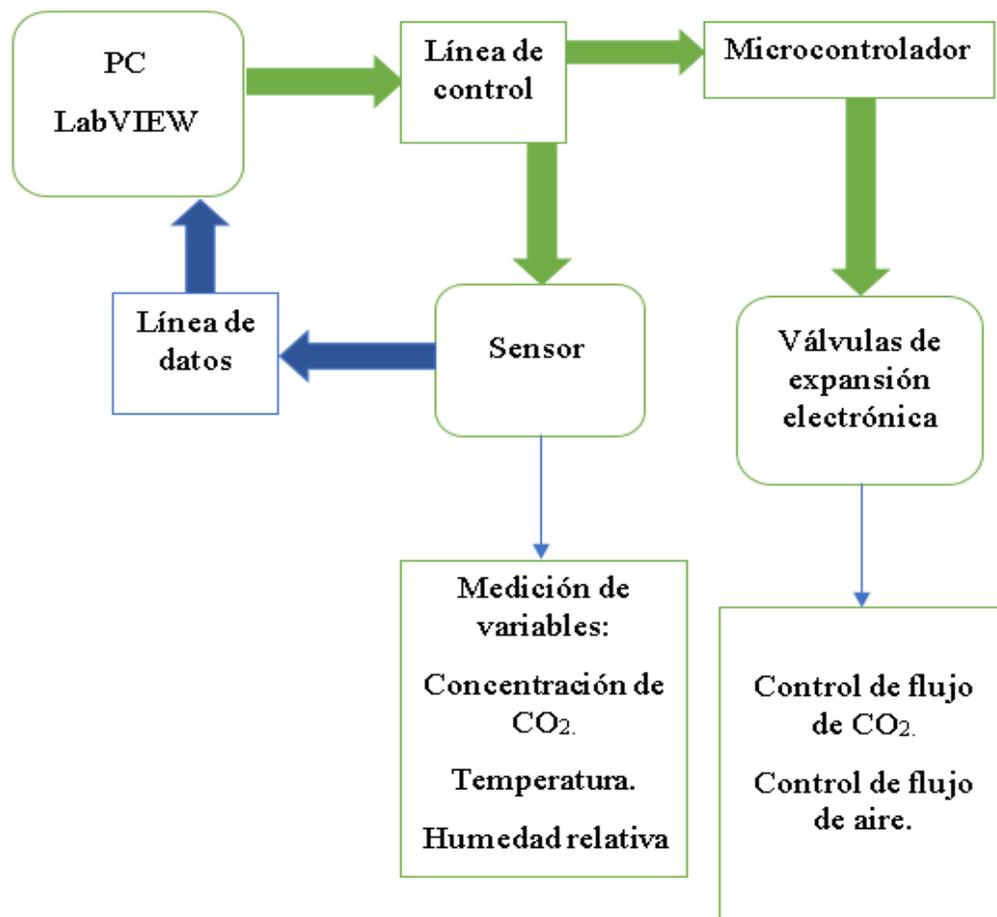


Figura 1.1 Estructura final del sistema de control para la cámara.

CAPÍTULO 2: META Y OBJETIVOS

2.1 Meta

Proveer al proyecto para de carbonatación acelerada, un sistema de adquisición de datos y control automático capaz de controlar las condiciones necesarias para poder hacer un estudio del fenómeno deseado, este control va a estar basado en un valor que determine el usuario del sistema, además se tiene la capacidad de recolectar los datos de las variables deseadas y almacenarlos para su uso posterior.

2.2 Objetivo General

Implementar un sistema de adquisición de datos y control que permita realizar el proceso de carbonatación acelerada del concreto reforzado de forma automatizada, determinando cual es el porcentaje de error en las variables medidas

Indicador: Información de los porcentajes de error obtenidos al realizar la medición de las variables.

2.3 Objetivos Específicos

1. Desarrollar un sistema de adquisición de datos que permita obtener la información correspondiente a las variables de temperatura, humedad relativa, concentración de CO₂ y el flujo de los gases involucrados en el proceso de carbonatación, determinando la precisión de los instrumentos al usarlos como sistema de adquisición de datos.

Indicador: Comparación entre la precisión de los instrumentos usados de forma individual y como sistema.

2. Implementar un control automático que permita regular la concentración de CO₂, dentro de la cámara de carbonatación acelerada y determinar la precisión del sistema para regular CO₂.

Indicador: Comparación entre el valor de CO2 indicado por el sistema y el valor medido dentro de la cámara usando solo el sensor.

3. Desarrollar bajo una misma interfaz gráfica las opciones para visualizar y guardar en tiempo real, las diferentes mediciones realizadas por el sistema, así como el control necesario para modificar la concentración de CO2 dentro de la cámara, y determinar la precisión del sistema para recolectar toda la información de forma simultánea.

Indicador: Comparación entre los valores de las variables de forma individual, y los valores medidos por el sistema.

CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO

En esta sección se hace una descripción de los temas y conceptos que están relacionados con la solución desarrollada, se realiza una explicación en detalle, primero de los antecedentes bibliográficos que establecen el estado del arte con respecto a los métodos y procedimientos utilizados para dar solución al problema planteado. Se hace referencia además a una serie de principios físicos y electrónicos que componen la solución del problema planteado.

3.1 Antecedentes bibliográficos

3.1.1 Ensayos de carbonatación acelerada.

El tema de la carbonatación acelerada ha sido estudiado ampliamente por la comunidad científica en general, y es un fenómeno que se ha documentado de forma extensiva y gracias a esto es posible lograr un conocimiento del tema haciendo una adecuada revisión bibliográfica de los trabajos publicados previamente. Este tipo de ensayos se han realizado bajo condiciones muy diversas y en diferentes áreas geográficas del planeta, es por esto que hacer una revisión de la mayoría de estos trabajos resulta enriquecedor a la hora de plantear un ensayo en la institución.

Los ensayos de carbonatación acelerada pueden realizarse bajo diversas condiciones, modificando los factores involucrados en el proceso, según sea necesario para el experimento que se desea realizar, pero el equipo usado para los ensayos debe de tener siempre una serie de especificaciones mínimas para poder realizar los experimentos y que estos sean considerados válidos y que sus resultados puedan ser analizados de forma correcta. De forma general la cámara de carbonatación que se utilice para realizar los ensayos debe de ser capaz de simular y mantener condiciones estables y constantes en el tiempo, de temperatura, humedad relativa y concentración de dióxido de carbono para que este reaccione con el concreto y se pueda estudiar el efecto que tienen estas condiciones sobre las probetas. Es necesario tener una fuente de aire comprimido, un sistema de humidificación y sistemas de control de flujo y presión. [2].

En el ámbito científico no existe ningún tipo de norma que dicte el diseño que debe de tener la cámara en cuanto a tamaño o materiales de construcción, los aparatos diseñados se adaptan a las necesidades de cada uno de los experimentos que se desean realizar. Debido a que no existen pautas para el diseño de este tipo de sistemas, algunos de los ensayos estudiados siguen las pautas de construcción para cámara de niebla salina. La construcción, instalación y operación de este tipo de cámaras para ensayos de corrosión, está regulada por la norma ASTM B-117, norma que es usada internacionalmente [3].

La variable de mayor importancia para poder hacer un ensayo adecuado de carbonatación acelerada, es el porcentaje de dióxido de carbono que se desee tener a lo internos, pero los valores de temperatura y humedad relativa juegan un papel importante en el comportamiento de las probetas al ser expuestas al medio controlado. Tomando en cuenta que la humedad relativa va a cambiar dependiendo del lugar donde se realicen los ensayos, es de vital importancia poder determinar cuál es el porcentaje de humedad ideal para el experimento para así poder mantenerlo constante durante el periodo por el cual este se extienda. Para lograr una humedad adecuada dentro del sistema, una de las soluciones implementadas es la de una torre de humidificación, esta consiste en un recipiente con una cantidad fija de agua y una entrada de aire en la parte inferior, la idea de este sistema es que el aire recorra el cuerpo de agua y al salir por la parte superior del recipiente este lleve un porcentaje de humedad que permita modificar el porcentaje dentro de la cámara. Este recipiente se puede construir con plexiglás, para poder observar el comportamiento del agua [2].

Los valores de humedad relativa dentro de la cámara se encuentran entre 65% [2] y hasta un 70% [4] , cabe destacar que estos valores de humedad se van a alcanzar de forma diferente según el sistema de humificación con el que se cuente y el volumen total de la cámara, si se hace uso de una torre de humificación se debe de hacer un experimento previo con distintos volúmenes de agua dentro de la torre, y con distintos flujos de aire para poder determinar los valores de estas dos variables que permitan llegar al valor deseado de humedad relativa. Además de determinar el valor de estos dos elementos es necesario observar cuanto se dura logrando una estabilidad en la humedad dentro de la cámara para poder mantenerla durante el periodo de tiempo por el cual se extienda el experimento.

Los valores de dióxido de carbono que se deben de mantener dentro de la cámara varían entre experimentos, un valor mencionado por varios investigadores es el de 4% [2] y [5]. Este es un valor relativamente bajo pero que permite hacer ensayos con resultados importantes, ya que es posible observar el efecto de la carbonatación en las probetas dentro de la cámara. Dependiendo del tamaño de la cámara de carbonatación construida es posible hacer ensayos con una saturación completa de dióxido de carbono dentro del sistema [4], este tipo de ensayo tiene la ventaja de que permiten observar los efectos de la carbonatación sobre las probetas en un tiempo más reducido.

En cuanto al gabinete o contenedor para las probetas, el diseño depende de cómo los investigadores quieran realizarlo, en la Figura 3.1 se muestra una de las propuestas para la cámara, esta usa como base de refuerzo un armazón de acero inoxidable 304, con ancho de 150 cm, alto 70 cm y profundidad 70cm. Las caras fueron construidas con láminas de plexiglás con espesor de 0,63 cm. En esta imagen es posible observar un esquema general de la cámara, los diferentes componentes de esta y la entrada para el aire comprimido y dióxido de carbono que en este caso son mezclados antes de entrar a la cámara.

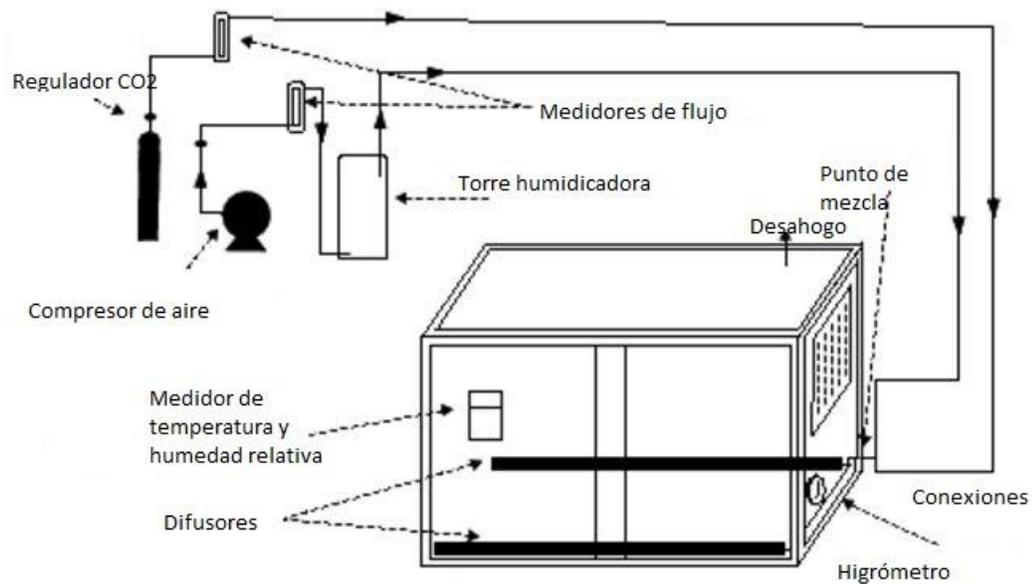


Figura 3.1 Estructura básica de una cámara de carbonatación. Obtenido de [2].

3.1.2 Automatización de procesos por medio de la interface LabVIEW-Arduino

Actualmente la tecnología está sufriendo cambios continuos y acelerados en todos los aspectos de la vida cotidiana, estos cambios afectan especialmente al campo de la ciencia y la investigación. Debido a la necesidad de realizar experimentos cada vez más complicados y extensos, se han desarrollado una serie de herramientas que permitan realizar ensayos por largos periodos de tiempo, sin que el investigador tenga que intervenir directamente durante la ejecución de mismo. Este proceso de automatización se puede llevar a cabo con una serie de herramientas que están disponibles en este momento, una de las opciones más accesibles es la de realizar automatización haciendo uso de la herramienta LabVIEW desarrollada por National Instruments, y haciendo uso de un dispositivo sencillo como el Arduino para poder hacer una interfaz entre los sensores y demás componentes externos del experimento, con la computadora en la cual se encuentre el software LabVIEW.

Haciendo uso de esta herramienta, la comunidad científica ha realizado una serie de experimentos automatizados, por ejemplo en el año 2015, Reuben Lasrado *et al.* [6] desarrollaron un sistema para simular la distribución de agua dentro de un hotel de playa, el propósito de este proyecto fue el de automatizar la distribución y el manejo de agua para que este se diera de forma óptima y así disminuir el desperdicio del recurso, y la cantidad de personas que se ocupan para lograr una buena distribución en todo el complejo. El valor de este ensayo reside en que muestra el poder que tiene la herramienta LabVIEW para la automatización de procesos, incluso un proceso de la vida cotidiana como lo es el del manejo del agua un recurso vital para el ser humano, en la Figura 3.2 es posible observar la interfaz gráfica desarrolla para el monitoreo del sistema de control automático realizado. Como se puede observar de esta figura la herramienta de software es muy versátil y permite realizar interfaces prácticas y que sea sencillas de utilizar para personas que no necesariamente tienen conocimiento científico especializado, además con hacer pequeñas modificaciones a los valores de control el sistema es capaz de encargarse de modificar internamente las variables necesarias para ajustar el control del fenómeno, siendo en este caso el fenómeno de el control de la cantidad de agua que va a cada uno de distribuidores. Esta técnica de desarrolla de una interfaz gráfica eficiente y sencilla de usar es clave a la hora de hacer uso de LabVIEW.



Figura 3.2 Interfaz gráfica desarrollada para el sistema de control de agua. Obtenido de [6].

Otro ejemplo de automatización haciendo uso de LabVIEW es el realizado por Pradeep *et al.* [7] en el año 2014, el cual consiste en un sistema que se encarga de rastrear la posición a lo largo del día para poder maximizar la cantidad de energía generada por una serie de paneles solares, para lograr esto hicieron uso de un conjunto de resistores dependientes de luz o LDR, estos está conectados un Arduino que se encarga de tomar los valores de resistencia entregados por estos, el sistema se mantiene monitoreando de forma constante los valores de intensidad de luz presentes para poder así ajustar los paneles al ángulo correcto para que estos reciban la mayor cantidad de intensidad de luz sola posible. El algoritmo fue diseñado por medio del software LabVIEW, este se encarga de pasar las instrucciones al Arduino, tanto para el monitoreo como para el ajuste de la posición de los paneles por medio de los motores DC.

Otro sistema que se realizó basado en este plataforma fue el realizado por Celia Pradeep *et al.* [8] en el año 2015, este sistema basado en señales EMG, producidas por el movimiento de los músculos de los brazos y la manos se encarga de mover un motor a pasos que funciona para darle movimiento a una prótesis, el sistema realizado se encarga de clasificar las señales EMG medidas, para diferentes velocidades y direcciones de acuerdo a la flexión o extensión de la mano que se esté realizando.

El sistema realizado con LabVIEW se encarga de recolectar las señales, procesarlas para eliminar cualquier ruido, o señal no deseada para que el movimiento del motor a pasos sea el deseado y por lo tanto para que la prótesis que este controla realice los movimientos con la precisión deseada.

Otro del alcance de la automatización haciendo uso de LabVIEW es el realizado por Arar Hemza *et al.* [9] en el año 2015, este sistema hace uso de una interfaz entre LabVIEW y Arduino para poder trazar la curva característica de corriente-tensión de un panel fotovoltaico en condiciones naturales. El objetivo de este ensayo era el de evaluar el comportamiento de los paneles fotovoltaicos a lo largo de su periodo de funcionamiento, ya que estos pierden su capacidad de convertir la energía solar en energía eléctrica conforme pasa el tiempo, de forma que la idea del experimento era evaluar el desempeño de estas estructuras para poder mejorarlas a futuro.

3.2 Principios físicos y electrónicos

3.2.1 La electroquímica de la corrosión.

El tema de la corrosión ha sido estudiado de forma extensiva por la comunidad científica durante muchos años, ya que los efectos destructivos que tiene este fenómeno en los metales causan daños a distintas estructuras. Es por esto que se debe de iniciar por entender el principio electroquímico de la corrosión, la corrosión metálica en medio ambiente húmedo es un proceso de naturaleza electroquímica que involucra reacciones de oxidación y reducción, ocasionando el deterioro del material metálico y de sus propiedades [1]. Para que se dé un proceso de corrosión electroquímica, es necesario tener una zona anódica, una zona catódica y un electrolito, además de una buena unión eléctrica entre ánodos y cátodos [10]. Esta estructura básica para la corrosión electroquímica se presenta en la figura 3.3. Es posible observar en esta figura, que el proceso que genera la corrosión es el movimiento de electrones entre al ánodo y el cátodo es decir, el causante de este fenómeno destructivo es la presencia de una corriente eléctrica que se desplaza entre las dos estructuras que conforman la celda electroquímica.

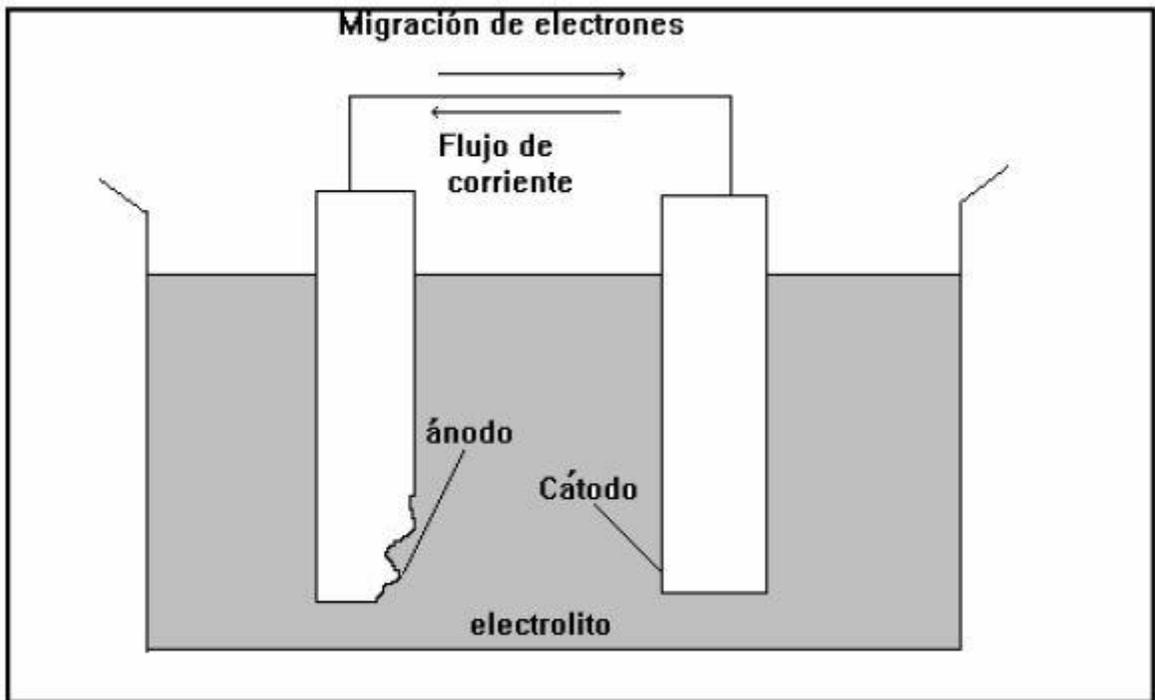


Figura 3.3 Estructura básica de una celda electroquímica. Obtenido de [1].

Para poder entender de forma adecuada el proceso de corrosión en su totalidad es necesario entender que procesos químicos se dan en cada una de las partes de la celda electroquímica. El ánodo es la sección de la superficie metálica en la cual se lleva a cabo el proceso de oxidación [11], en este proceso hay una pérdida o liberación de electrones como se representa en la siguiente reacción [1].



El cátodo es la sección de la superficie metálica en donde se lleva a cabo la reacción de reducción, en la cual los electrones que se producen en la oxidación en el ánodo se combinan con iones presentes en el electrolito, en este proceso hay ganancia de electrones y es en esta sección en la cual se cierra el circuito eléctrico a través de un conductor externo, de la siguiente forma [1].

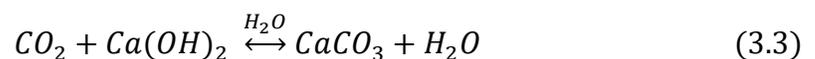


Además la celda electroquímica tiene como componente el electrolito, el cual es la sustancia a través de la cual las cargas eléctricas son transportadas por un flujo de iones. El conductor metálico el cual es un elemento externo que conecta eléctricamente el ánodo y el cátodo.

3.2.2 El proceso de carbonatación.

Una vez entendido el proceso de corrosión de los metales, es posible pasar a hacer un breve estudio del proceso de carbonatación para entender el fenómeno físico y químico que existe detrás del proceso. En términos generales la carbonatación en el concreto es la pérdida de pH que ocurre cuando el dióxido de carbono atmosférico reacciona con la humedad dentro de la estructura porosa del concreto reforzado y convierte al hidróxido de calcio con alto pH a carbonato de calcio, que tiene un pH más neutral. La reducción del pH del concreto resulta problemático debido a que el concreto tiene un rango de pH de 12 a 13, y este valor protege al acero de refuerzo contra la corrosión. Esta protección es posible debido a la formación de una capa de óxido pasivo sobre la superficie del acero, la cual permanece estable en el ambiente altamente alcalino [12].

En un principio el dióxido de carbono no tiene la capacidad de penetrar profundamente dentro del concreto reforzado, debido a que reacciona con el calibre del concreto superficial, de acuerdo con la siguiente reacción [13].



Esta reacción da como resultado un cambio en el pH del concreto de la siguiente forma [13].

$$pH = 12.5 \text{ a } 13.5 \rightarrow pH \cong 9 \quad (3.3)$$

El proceso descrito previamente se puede observar en la Figura 3.4, de este esquema es posible analizar cómo se da la difusión del dióxido de carbono en los poros llenos de aire que se encuentran en la estructura del concreto, y como se da la reacción química descrita en la ecuación 3.3, como se mencionó previamente esta reacción química tiene como resultado una disminución en el pH de la estructura de concreto.

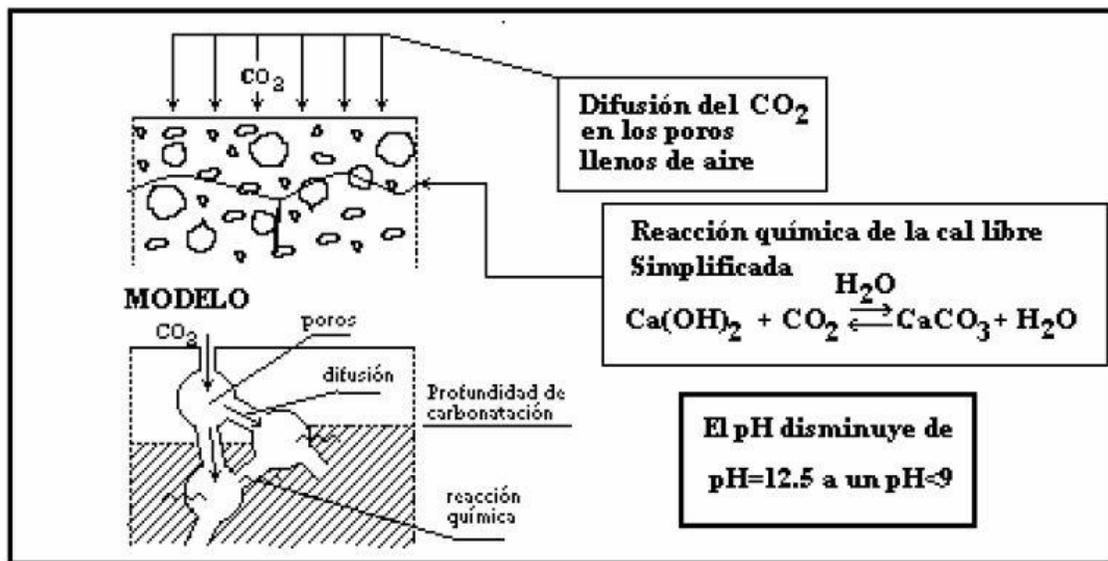


Figura 3.4 Esquema del proceso inicial de carbonatación. Obtenido de [1].

La porción externa de la mezcla de concreto se carbonata rápidamente una vez que empieza el proceso, pero esto no hace que el dióxido de carbono deje de ingresar en la estructura porosa del concreto, por el contrario este continuo su ingreso a mayor profundidad y cuando el pH en el concreto alrededor del acero de refuerzo llega a un valor cercano a 9, la capa protectora mencionada previamente pierde su estabilidad termodinámica y es en este momento que existe la posibilidad de que se dé la corrosión en el acero de refuerzo [1].

La profundidad a la cual el dióxido de carbono ha penetrado, y modificado el pH del concreto, se le conoce como “frente de carbonatación”, los ensayos de carbonatación acelerada hacen análisis del frente de carbonatación después de periodos de tiempo definidos. Haciendo un análisis de estos datos se deduce la influencia de la cantidad de cemento con respecto al agua en la fabricación de las mezclas, sobre el fenómeno de carbonatación [14].

De los ensayos de carbonatación es útil poder conocer a qué velocidad avanza el frente de carbonatación, para poder hacer estimaciones de profundidad y saber si esta ha alcanzado la interfaz concreto-acero y poder dar una aproximación del estado superficial de la capa protectora de la varilla de refuerzo [1].

La penetración del dióxido de carbono en una estructura de cemento reforzado, está determinada por dos factores principales, siendo estos la forma de la estructura de los poros y por el volumen de estos poros que este ocupado por agua, o por el contrario que este ocupado por aire. Este aspecto es importante debido a que la velocidad de difusión del CO_2 en el agua es 10^4 veces más lenta que la difusión en el aire. Si el poro del concreto está completamente seco, el dióxido de carbono se difunde fácilmente pero no puede ocurrir la carbonatación, debido a la falta de agua. Si el poro está lleno de agua, la carbonatación que se presenta es mínima debido a la poca difusión del dióxido de carbono en el agua. Por ultimo si él está parcialmente lleno de agua la carbonatación avanza hasta el espesor en el cual los poros del concreto están secos, estos tres posibles escenarios se observan en la Figura 3.5. De forma que como menciona Angélica del Valle *et al.* [1], los parámetros que determinan la velocidad de carbonatación son: la composición y cantidad de cemento, la compactación, condiciones de curado y condiciones ambientales de exposición del concreto.

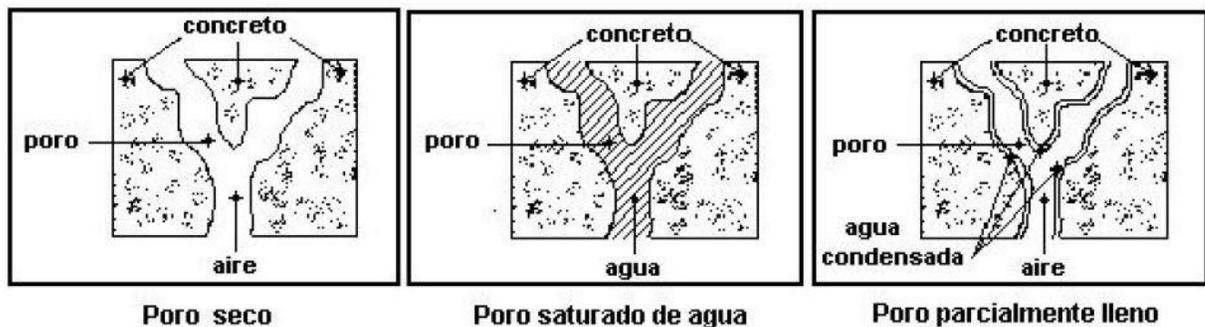


Figura 3.5 Comportamiento de la carbonatación según contenido del poro. Obtenido de [1].

3.2.3 Pruebas para determinar el frente de carbonatación.

Para determinar cuál es el frente de carbonatación, es decir la profundidad de penetración del dióxido de carbono en el concreto existen una serie de pruebas que pueden realizarse, entre ellas están: análisis termogravimétrico, porosimetría por intrusión de mercurio, evaluación de la porosidad accesible al agua y resonancia magnética nuclear entre otras [15].

La prueba más común para detectar la profundidad del frente de carbonatación es la de hacer uso de fenolftaleína al 1% como indicador, este elemento se utiliza como un indicador de alcalinidad, al ser aplicado sobre la superficie del concreto este se torna de un color rosa si no fue afectado por la carbonatación. Este prueba funciona como indicador dentro de un ensayo, pero siempre se debe de considerar la posibilidad de usar más de una técnica para determinar el frente de carbonatación, ya que la fenolftaleína, presenta un rango de pH de 8.2 a 10, es decir es incolora por debajo de 8.2 y presenta el color rosa mencionado previamente cuando el valor de pH es mayor a 10 [16] . En la Figura 3.6 se presentan una serie de probetas sobre las cuales se aplicó la prueba con fenolftaleína al 1%.



Figura 3.6 Cilindros de concreto rociados con fenolftaleína al 1%. Obtenido de [17].

Además de la prueba con indicador se pueden hacer pruebas de la resistencia mecánica del concreto después del periodo de carbonatación, una de estas es la prueba a de la resistencia a la compresión que presenta la probeta después de la exposición. En esta prueba en específico se puede observar como la resistencia a compresión de las probetas expuestas a un ambiente con un alto contenido de CO_2 es mayor a la resistencia que presentan las probetas que no fueron expuestas, esto debido a que el compuesto CaCO_3 generado en el proceso de carbonatación ocupar un mayor volumen en la superficie porosa del concreto, que el compuesto Ca(OH)_2 [18] . Se pueden realizar otras pruebas a posteriores al ensayo, como lo son: prueba de resistencia eléctrica, prueba de penetración de cloruro entre otras.

3.2.4 Medición de concentración de dióxido de carbono.

La medición de concentración de CO_2 , se puede realizar de distintas formas existen una serie de procedimientos físicos que son aplicables teniendo el equipo adecuado y que pueden permitir una lectura correcta y precisa del concentración de dióxido de carbono. Una de las técnicas disponibles es la de la espectrografía de infrarrojo, esta técnica consiste en hacer pasar un haz de luz infrarrojo por una cámara o contenedor de CO_2 , posteriormente se hace un análisis de la cantidad de luz infrarroja que fue absorbida dentro de la cámara de muestras que contiene el gas, debido a que la cantidad de luz absorbida es proporcional a la concentración de moléculas que tienen la capacidad de absorber, la concentración de dióxido de carbono se determina haciendo una comparación de la cantidad absorbida medida y un estándar conocido [19]. Un ejemplo de este sistema se muestra en la Figura 3.7.

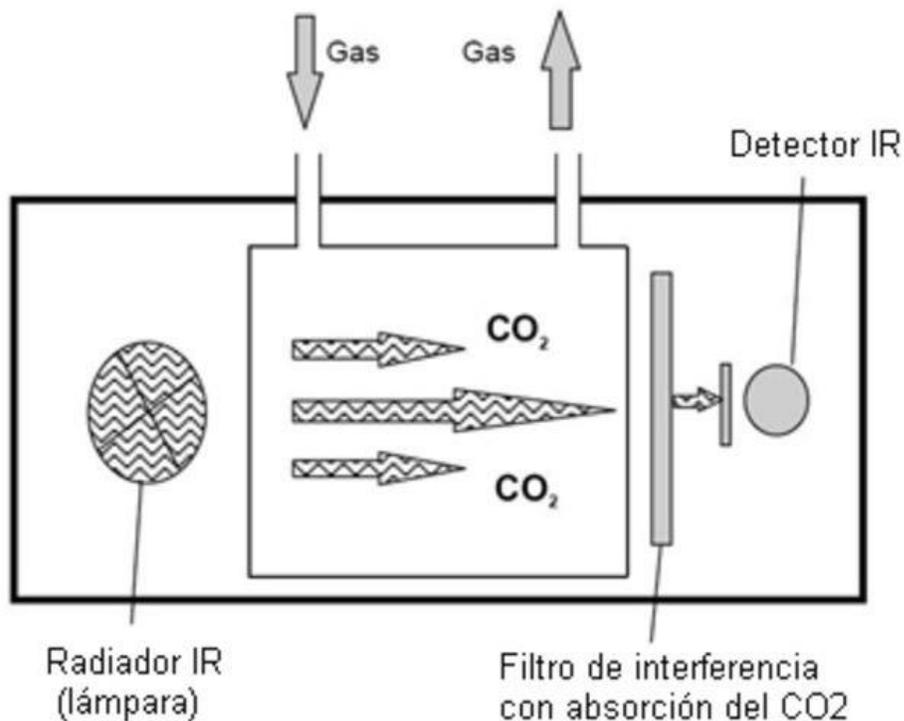


Figura 3.7 Sensor de detección por NDIR. Obtenido de [20]

Otra técnica altamente utilizada para la determinación de la concentración de dióxido de carbono, es la de la espectroscopía de Raman, esta es una técnica que consiste en hacer interactuar un haz de radiación electromagnética con algún sistema cuyas características quieran ser determinadas, de forma general el haz saliente difiere del entrante por efecto de una interacción con el sistema [21]. Para el caso específico del dióxido de carbono, el gas a analizar es aspirado hacia una cámara, en donde este es iluminado con un láser monocromático de argón de alta intensidad. El haz de luz es absorbido por las moléculas y esto las lleva a un estado energético rotacional, estando las moléculas en esta fase se hace uso de un analizador de espectros para identificar las moléculas dentro de la cámara y por lo tanto identificar así la concentración de dióxido de carbono presente.

Otra técnica disponible para determinar la concentración de dióxido de carbono en un ambiente es la de la espectrometría de masas, esta es una técnica que permite estudiar compuestos de distintas naturalezas y obtener información cualitativa o cuantitativa, mediante este análisis es posible obtener información de masa molecular de un compuesto, así como información estructural del mismo o solo detectar su presencia y cuantificar su concentración, para esto es necesario ionizar las moléculas, utilizando si fuera preciso una separación cromatografía previa y obtener los iones formados en fase gaseosa [22].

Por ultimo existe otra posibilidad para la detección de dióxido de carbono y esta es la de la espectroscopia fotoacústica, esta técnica se basa en el mismo principio que la técnica de detección por infrarrojo descrita previamente, siendo esta la característica que tienen los gases como el CO₂, para absorber la luz infrarroja. Pero estas dos técnicas se diferencian en que la espectroscopia fotoacústica usa como su nombre lo dice, una principio acústico para la detección del gas, cuando una haz de luz infrarroja se aplica sobre un gas, este expande y por lo tanto se da un incremento en la presión del contenedor, si el haz de luz se aplica en forma de pulsos el comportamiento de expansión del gas seguirá un patrón de pulsos, si este patrón de pulsos se genera con una frecuencia audible se va a generar una señal acústica y esta será detectada por un micrófono. Este tipo de medición no ocupa una referencia y el cero se alcanza cuando no hay gas dentro de la cámara de medición, debido a que si no hay gas no se genera ningún tipo de señal acústica medible [23].

Para el presente experimento se va a hacer uso de un sensor con tecnología de medición por medio de un haz de luz infrarrojo o NDIR por sus siglas en inglés. Este tipo de sensor es altamente utilizado en la industria y en aplicaciones a menor escala, debido a que es compacto y permite realizar mediciones precisas de concentración de CO₂, haciendo que este sea una opción ideal para experimentos en ambientes cerrados, como incubadoras o cámaras para distintos ensayos.

3.2.5 Válvulas de expansión electrónica.

Las válvulas de expansión electrónica son dispositivos altamente utilizados en la industria, para controlar flujos de gases o líquidos en diversos sistemas estas resultan altamente prácticas cuando se realizan sistemas complejos con controles especializados que tengan que modificar flujos de acuerdo a la condición en la cual se encuentren. Si bien es cierto el uso de este tipo de válvulas se da mayormente en el sector industrial, estas se están empezando a utilizar en el sector de la ciencia para lograr controlar sistemas que requieran flujos de gases o líquidos para poder hacer diferentes ensayos.

Un ejemplo del uso de las válvulas de expansión electrónica en el campo científico es el ensayo realizado por Thae Su Aye *et al.* [24] en el año 2008 el cual es un sistema de control para un aire acondicionado haciendo uso de válvulas de expansión electrónica para controlar el flujo de gas. De este ensayo es posible observar como este tipo de válvulas son ideales para cuando se quiere diseñar un sistema de control digital, ya que estas se pueden controlar directamente haciendo uso de algún tipo de microcontrolador y un driver para poder energizarlas de forma adecuada.

Las válvulas de expansión electrónica se pueden dividir en cuatro grandes grupos, las que son controladas por pulsos, las analógicas, las termostáticas y por últimos las válvulas de expansión que se controlan por medio de un motor a pasos [25]. La válvula controlada por medio de un motor a pasos convierte pulsos en movimiento mecánico, cada pulso hacer que el eje rote una cierta cantidad de pasos o un ángulo determinado, cada uno de estos movimientos es preciso y se puede repetir de forma exacta, es por esto que este tipo de válvulas son ideales para aplicaciones que necesiten posicionamiento preciso [24].

3.2.6 Motores paso a paso.

Previamente se explicó el funcionamiento general de una válvula de expansión electrónica, destacando que la controlada por motores paso a paso es la más precisa, es por esto que para este ensayo se va a hacer uso de este tipo de válvula, a continuación se explica el funcionamiento de un motor paso a paso para poder dejar en claro de qué forma se debe de controlar este para que la válvula realice los desplazamientos deseados según sea lo necesario para cada situación.

Primero es necesario definir un motor paso a paso como un dispositivo que convierte una serie de impulsos eléctricos en una rotación mecánica proporcional de su eje, es decir es un dispositivo que tiene la capacidad de girar una cantidad finita de grados de acuerdo a las señales de control que este reciba [26] . Existen varios tipos de motores paso a paso:

- a. De imán permanente: el rotor en este tipo de motor consiste en un imán permanente en de forma circular, que está montado sobre un eje. Este tipo de motor opera según la atracción o repulsión que ejercen las bobinas energizadas en su estator sobre el rotor, donde el ángulo que se avanza con cada paso es determinado por la manera o secuencia en que se energizan sus bobinas [27].
- b. De reluctancia variable: este motor tiene un rotor dentado de hierro con un estator devanado, el número de dientes tanto del rotor como del estator y la configuración de bobinas en el estator determinan que ángulo se avanza con cada paso. Este tipo de motores son de bajo torque, por lo tanto se usan para aplicaciones con cargas pequeñas [27].
- c. Híbridos: Son una combinación de los dos tipos anteriores, el estator está construido por ocho polos que son energizados por devanados de dos fases. El rotor consiste en un cilindro magnético que se magnetiza de manera axial con respecto a las bobinas del estator. El ángulo con el que avanza por cada paso depende de la construcción del motor. Este tipo de motor es el de más uso en la industria ya que tiene un mayor torque que los dos previos [27].

CAPÍTULO 4. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

En este capítulo se hace una descripción del procedimiento que se siguió para llegar a la solución de problema planteado, para esto se siguieron las etapas de diseño que forman parte de todo proyecto de ingeniería [28]. Para cada una de las etapas se hace una descripción de las actividades que se realizaron, los criterios aplicados y procedimiento para buscar la mejor solución al tema de interés.

4.1 Reconocimiento y definición del problema

Para identificar adecuadamente el problema fue necesario concretar reuniones con los profesores encargados del proyecto, Dr. Bruno Chinè y el profesor Ing. Ronald Jiménez. En la primera de estas reuniones, llevada a cabo con el Dr. Bruno Chinè se discutió el problema de forma general, en este caso particular no existe una estructura previa sobre la cual basar el proyecto, por lo tanto la construcción de la estructura física se basó en los ensayos realizados previamente por la comunidad científica y en el criterio y experiencia de los profesores involucrados en el proyecto.

En una segunda reunión se discutió cual era el alcance del proyecto, las expectativas de la implementación final del sistema, su funcionalidad y sus limitaciones. Posteriormente se definieron de forma general las posibles soluciones al problema planteado, discutiendo para cada una de ellas su viabilidad tomando en cuenta los recursos disponibles, tanto de elementos electrónicos como de recursos monetarios para la compra de equipo faltante. Es importante destacar que en estas discusiones siempre se tuvo en mente que el sistema fuera lo más eficiente posible y que aprovechara al máximo todos los recursos disponibles.

Posteriormente se realizó una tercera reunión, con el objetivo de definir concretamente el alcance del sistema a realizar, sus limitaciones y el uso de los recursos disponibles, además se realizó una pequeña proyección en cuanto a los recursos faltantes para un adecuado desarrollo y funcionamiento del sistema final, dejando en claro que necesidades de recursos existían desde el inicio del proyecto y como resolverlas a tiempo para poder finalizar el sistema dentro del periodo esperado.

4.2 Obtención y análisis de información

Para definir el estado del arte del tema bajo estudio, se recurre primero a realizar una reunión con el Dr. Bruno Chiné esto con el fin de tratar temas relacionados con la carbonatación siendo este el tema principal de estudio, y con el fin de obtener una orientación a la hora de realizar búsqueda de información para lograr entender un tema tan amplio como lo puede llegar a ser este. Esta reunión fue una parte clave del proyecto ya que no se puede empezar con el desarrollo e investigación de la parte de electrónica del proyecto si no se tiene una base clara del fenómeno bajo estudio, tanto a nivel químico como físico.

Una vez despejadas las dudas generales sobre el fenómeno de la carbonatación, la investigación se desarrolló en torno a los requisitos del sistema final, estudiando los distintos tipos de sensores necesarios y las distintas forma de obtener datos y de controlar sistemas haciendo uso del software disponible en el laboratorio, siendo este el software de National Instruments, LabVIEW. Esta investigación se desarrolló a lo largo de un extenso periodo de tiempo, e involucró constantes consultas de referencias bibliográficas disponibles en línea, como lo son: informes técnicos, libros electrónicos, sitios web, actas de conferencias, papers de temas similares y otro tipo de recursos disponibles, todo esto con el objetivo de tener una adecuada base para el desarrollo de las propuestas de solución para el problema.

4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de la solución

Para poder plantear las posibles soluciones para el problema propuesto se hizo una investigación de proyectos similares, con aplicaciones afines al tema en cuestión, esto para poder realizar una propuesta de solución adecuadamente fundamentada, sabiendo que va a ser posible desarrollarla y que esta va a cumplir con los requerimientos del sistema, que fueron previamente discutidos.

Con esta información recopilada se plantean las posibles propuestas de solución para el problema, estas fueron posteriormente evaluadas y la elección de la solución final para el problema se basó en el criterio de maximizar el uso de recursos y de lograr todas las funciones planteadas previamente, haciendo uso de estos criterios se eligió la solución que mejor se ajustaba a las necesidades del proyecto, para poder cumplir todos los objetivos propuesto.

4.4 Implementación de la solución

Una vez que se evaluaron las posibles rutas de solución, se toma la decisión de hacer uso de una de ellas, la cual cumple de mejor forma con los requisitos presentados previamente. Posteriormente se da inicio al desarrollo del proyecto, la primera etapa es la de hacer un inventario de los recursos disponibles para la construcción del sistema y hacer una lista de los que no están disponibles para empezar el trámite de adquisición de los mismos.

La segunda etapa consiste en entrar de lleno con el diseño del sistema, debido a que la concentración de dióxido de carbono dentro del sistema es el eje principal de análisis y diseño, es de vital importancia que el primer paso a realizar sea el de lograr una comunicación con el sensor que se encarga de obtener los valores de concentración de dióxido de carbono. Para lograr este objetivo, se planteó un algoritmo de comunicación, este sensor tiene la particularidad de que tiene la posibilidad de lograr comunicación con diferentes protocolos, para esta aplicación específica se decide diseñar un protocolo de comunicación UART. Este protocolo se realizó por medio de LabVIEW, escribiendo directamente al sensor por medio de un puerto serial, y esperando la respuesta del mismo con el valor de concentración de dióxido de carbono. El sensor utilizado para esta aplicación, tiene la característica de que permite obtener mediciones de temperatura y humedad relativa dentro de la cámara, debido a esto se debe de extender el protocolo de comunicación, para enviar las instrucciones al sensor y recibir los datos de estas dos variables.

Una tercera etapa consistió en hacer un sistema de adquisición de datos, para las variables mencionadas previamente, es importante para el proyecto que estas se grafiquen en tiempo real y que se muestre el último valor de estas en la interfaz. Una vez realizado esto se realiza un ensayo de mediciones, para corroborar el adecuado funcionamiento del sistema de adquisición de datos y del sistema que se encarga de graficar. Además en esta fase del experimento se decide poner a funcionar un módulo que se encarga de tomar los datos de las tres variables de importancia, CO₂, temperatura y humedad relativa, y los escribe en una hoja de Excel para su posterior uso.

La cuarta etapa de diseño consistió en integrar en la interfaz gráfica previamente diseñada, un control para la concentración de dióxido de carbono deseada dentro de la cámara. Este consiste en un indicador numeral, en el cual el usuario ingresa el valor porcentual de concentración deseado dentro de la cámara, una vez definido este valor se realiza una comparación de valor medido con el valor deseado de concentración, y se calcula el valor porcentual faltante.

Finalmente se diseña un sistema para el control de la válvula de expansión electrónica encargada de regular el flujo de dióxido de carbono hacia la cámara, esta válvula como ya se explicó previamente, se controla por medio de un motor a pasos unipolar para lograr hacer una interface de la válvula con el sistema en Labview, se hace uso de un microcontrolador de uso general, siendo en este caso un Arduino.

4.5 Reevaluación y rediseño

El proyecto diseñado alcanzó las expectativas planteadas al inicio y no es necesario hacer ninguna modificación importante al sistema diseñado, sin embargo se considera que es posible en un futuro agregar nuevas funcionalidades al sistema, por ejemplo un control de temperatura interna, este con el fin de controlar esta variable para realizar ensayos más precisos.

CAPÍTULO 5. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y CONTROL AUTOMÁTICO DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN UNA CAMARA DE CARBONATACIÓN ACELERADA , DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN.

5.1 Análisis de solución final para el sistema

En las secciones previas del presente documento se ha realizado una amplia descripción del problema en cuestión, empezando por una explicación del fenómeno a nivel físico y químico, destacando reacciones y distintos eventos involucrados en el fenómeno de la carbonatación. Además se presentó de forma breve la importancia que tiene el estudio de este fenómeno, tanto para la sociedad en general como para la comunidad científica. En este capítulo se plantea una descripción detallada del trabajo de ingeniería realizado, enfocado al tema de la ingeniería en electrónica y como se aplicaron los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera para resolver el problema propuesto.

5.1.1 Propuesta de solución final

En el momento en el cual se elige una solución final para el problema presentado, se debe de entrar de lleno en el proceso de diseño siguiendo un orden lógico de acuerdo a las necesidades del proyecto y de acuerdo a la importancia que tiene cada etapa del sistema para el diseño final.

El primer paso para la implementación de la solución es el de elaborar un protocolo de comunicación que permita obtener la información de concentración de dióxido de carbono, temperatura y humedad relativa dentro de la cámara. Para esto el sensor disponible ofrece dos opciones para la comunicación, esta se puede hacer por medio de un protocolo serial UART o de forma alternativa se puede hacer uso del protocolo I2C [29]. De forma que la primera decisión con respecto al sensor se presenta en esta etapa. Los dos protocolos de comunicación son de tipo serial, estos son comunes en la industria y requieren poca cantidad de cables para establecer la comunicación ya que la información se envía de forma secuencial [30].

Para fines prácticos se puede hacer uso de cualquiera de los dos protocolos, el sensor se comporta de la misma forma sin importar cual protocolo de comunicación se use. Para el caso del proyecto, el sensor incluye un cable de tecnología FTDI, el cual tiene un puerto USB que incluye un chip para realizar la conversión a FTDI RS232 un lado y en el otro tiene un terminal TTL, este tipo de cables son usados para programar distintos dispositivos, y lograr la comunicación con sensores y otro tipo de periféricos que requieran una tensión fija de 3.3V o 5V para poder establecer comunicación [31]. Este tipo de cable es el que se necesita para poder comunicarse con el sensor haciendo uso de el puerto UART con el que este cuenta, por este motivo se decide hacer uso de este protocolo.

Posteriormente se empieza a realizar el protocolo de comunicación haciendo uso de LabVIEW, debido a que se decidió usar una interfaz de comunicación serial es necesario hacer una investigación acerca de este tipo de puerto y su implementación en LabVIEW. La empresa National Instruments, la cual fabrica este software tiene una guía de inicio para hacer uso de este puerto, esta habla de pasos básicos y problemas comunes que se pueden presentar al hacer uso de estos puertos [32]. Como se menciona en este documento la interfaz a usar cuando se quiere tener comunicación con algún tipo de periférico es la interfaz VISA, esta es una interfaz para programar dispositivos, comunicarse y controlar los mismos [33]. Haciendo uso de esta interfaz es posible abrir el puerto necesario para establecer comunicación con el sensor y poder enviar las instrucciones necesarias y recibir los datos del mismo. Cabe destacar que para cada una de las variables que el sensor puede medir, es necesario enviar una instrucción específica y esperar una respuesta con un formato específico para saber si esta es la adecuada. Cabe destacar que este sensor es muy sensible a instrucciones mal escritas o enviadas en un momento no adecuado, es por esto que la parte más importante de este protocolo de comunicación es la sincronización, si no se sincroniza adecuadamente el envío de instrucciones desde la computadora, y la espera de la respuesta del sensor es muy probable que se pierda la información o que el sensor reinicie su operación si se escribe en un momento incorrecto, de forma que el desarrollo de una adecuada sincronización fue la parte más importante de esta etapa. Una vez realizado el protocolo de comunicación este se prueba durante un periodo extendido de tiempo para comprobar su funcionamiento.

Posteriormente a la realización del protocolo de comunicación se programa un sistema que permita graficar los datos que envía el sensor directamente en la pantalla, para esto el programa LabVIEW ofrece una serie de alternativas, para el caso de este ensayo, lo que se necesita es un gráfico 2D, que muestre en el eje x el tiempo transcurrido y en el eje y el valor de cada variable, para simplificar la lectura para el usuario, se realiza un gráfico para cada variable, es decir uno para temperatura uno para concentración de dióxido de carbono y finalmente uno para humedad relativa, estos gráficos se realizan haciendo uso de la función para graficar disponible en el software [34]. Antes de poder graficar los datos que vienen del sensor es necesario hacerles un filtro, para asegurarse de que los datos son lecturas correctas y que no contienen ruido o valores que no correspondan a mediciones lógicas de las variables. Una vez que se tiene el filtro implementado y probado, se configuran las características de cada gráfico, para que sean sencillos de distinguir para el usuario según su color.

Seguido de esto se debe de hacer un sistema que permita guardar los datos que entrega el sensor, para esto lo que se solicitó es un sistema que permita escribir en una hoja de Excel cada uno de los datos conforme van llegando. Una de las alternativas de solución es hacer uso de la función de escritura incorporada en LabVIEW, pues crea un archivo de mediciones que guarda la hora a la cual fue escrito cada dato, y tiene la capacidad de escribir varios datos en orden en una misma hoja de Excel. Por otro lado si esta función no resulta adecuada por el hecho de que no se necesita la hora ni fecha de escritura, se puede hacer uso de la función sencilla de escritura, la cual solo toma los datos y los escribe en una columna dentro de la hoja de Excel. Por último si no se quiere usar ninguna de estas dos opciones, y no es necesario guardar todos los datos en una hoja, se pueden copiar los datos directamente del gráfico en LabVIEW, haciendo click derecho sobre la imagen e importando los datos escritos [35].

Posteriormente se debe de añadir al sistema en LabVIEW una opción para permitir que el usuario ingrese el valor deseado de concentración dentro de la cámara, el programa tiene un espacio de tipo numérico para ingresar el valor porcentual de concentración deseado, este valor es comparado con el valor medido por el sensor y se envía la instrucción a la válvula de expansión electrónica.

Una vez que se diseñó este sistema capaz de graficar y guardar los datos enviados por el sensor, se procede a realizar un ensayo durante un periodo extendido de tiempo para asegurar que el protocolo de comunicación es suficientemente robusto y no presenta fallos a la hora de tener que operar por un tiempo extendido sin pausas. Este periodo de prueba consistió en colocar el sensor dentro de la cámara de carbonatación y poner en funcionamiento el protocolo de comunicación realizado en LabVIEW durante 28 horas consecutivas, este fue un periodo de una extensión adecuada para probar el funcionamiento del protocolo de comunicación.

Después de este periodo de prueba se procede a la realización del último componente del sistema dentro de LabVIEW, siendo este el de escritura al Arduino. Se debe de escribir la instrucción para que este se encargue de mover la válvula de expansión electrónica de acuerdo a la concentración faltante enviada por el software. Para lograr que el sistema envíe la instrucción adecuada al Arduino es necesario diseñar un protocolo de comunicación similar al realizado para el sensor, haciendo uso de las funcionalidades de VISA dentro de LabVIEW [33]. Este protocolo presenta las mismas dificultades de sincronización que el protocolo realizado previamente debido a que el Arduino trabaja a una velocidad menor que el sistema en la computadora, debido a esto la sincronización se debe ajustar para que no se den errores en la comunicación.

Una vez realizado el sistema para enviar la información al Arduino, dispositivo encargado del control de las válvulas de expansión electrónica, se debe de trabajar en el diseño para controlar las mismas. La instrucción enviada desde el computador, la cual es la diferencia entre la concentración deseada y la concentración medida, sirve para que el Arduino a su vez controle la apertura de la válvula según sea requerido, para el control de una válvula involucrada en un sistema de este tipo, generalmente se hace uso de un control proporcional [24]. Este tipo de control consiste en tener un punto de referencia, al cual debe de llegar el sistema, en este caso la concentración de CO₂ deseada, y realizar constantes mediciones del valor actual del sistema con estas mediciones de la variable de control se realiza un ajuste de la válvula, para que esta abra la válvula o la cierre de acuerdo a la cercanía del valor actual leído con el valor deseado ingresado por el usuario del sistema.

Realizado el ajuste necesario, el sistema vuelve a su punto de inicio, en el indica al sensor que debe iniciar la lectura de las variables, y el ciclo descrito previamente se vuelve a repetir, esto con el fin de lograr alcanzar el valor indicado por el usuario, una vez que este valor se alcanza la indicación para la válvula es nula, por lo tanto esta se mantiene cerrada hasta que le llegue una nueva indicación de movimiento.

5.2 Descripción del hardware

El sistema final realizado cuenta con tres componentes de hardware externos, sin los cuales no sería posible la puesta en operación de los ensayos, estos son: sensor de dióxido de carbono, válvula de expansión electrónica y el driver para el control de la válvula. En la siguiente sección se hace una descripción de cada uno de estos componentes, sus características y funcionamiento en general, para posteriormente hacer una descripción del software y de cómo ambas secciones se unen para hacer que el sistema funcione como conjunto.

5.2.1 Sensor de dióxido de carbono.

Debido a orden lógico de funcionamiento es necesario empezar la descripción del hardware, haciendo un resumen del funcionamiento del sensor escogido para el sistema. El sensor destinado para el proyecto es el K33-BLG, construido por la empresa Senseair. Este dispositivo tiene una serie de características físicas que lo convierten en una particularmente útil para usar dentro de la cámara de carbonatación. Entre sus principales características se encuentran: tipo de medición por difusión haciendo uso de la tecnología NDIR, rango de medición 0 a 30%, rango de medición de temperatura de -40 a 60°C, rango medición de humedad relativa 0 a 100%, incluye una memoria con capacidad para almacenar 5400 datos, puede funcionar con batería y no requiere ningún tipo de mantenimiento [36]. Es posible observar de estos datos como el sensor presenta características ideales para aplicaciones científicas.

La última característica destacable del sensor es que permite operación con batería de forma que es posible colocar en lugares remotos sin alimentación, obteniendo datos de forma automática y guardándolos para cuando necesiten ser recolectados.

Como se mencionó previamente el sensor permite comunicación con una variedad de protocolos seriales, debido a que el sensor viene de fábrica con un cable de tecnología FTDI, se elaboró un protocolo de comunicación UART. Las instrucciones necesarias para iniciar la comunicación con el sensor, y para obtener lecturas con este se presentan en la tabla 5.1 [37].

Tabla 5.1 Instrucciones para comunicación UART con el sensor K33-BLG.

Instrucción	Computador(Envía orden)	Sensor(Respuesta a la orden)
Iniciar mediciones	0xFE4100600135E8	0xFE4181E0
Valor de CO ₂	0xFE440008029F25	0xFE44020190
Valor de Temperatura	0xFE440012029445	0xFE44020190
Valor de humedad relativa	0xFE4400140297E5	0xFE44020190

De esta tabla es posible observar que para cada variable la instrucción enviada desde el computador varia, ya que esta se dirige a una dirección de memoria diferente según sea la necesidad, también las respuestas del sensor incluidas en la Tabla 5.1 son ejemplos ya que en los bytes 3 y 4 del paquete de datos es donde se encuentra la información de las variables. Teniendo claro que instrucción corresponde a cada variable, se procede a construir el algoritmo para la comunicación. Para el desarrollo de este algoritmo se hace uso del software LabVIEW, es importante tener en cuenta que este tipo de sensor necesita un tiempo mínimo de 20 segundos entre lecturas para que los datos sean los correctos, si este espacio no se respeta, los valores leídos no va a corresponder a los valores reales de las variables dentro de la cámara, también es necesario considerar que el computador trabaja a una velocidad superior al sensor, por lo tanto a la hora de sincronizar la comunicación se deben de dar espacios para que la información salga por el puerto serial y sensor la reciba antes de enviar otra instrucción.

5.2.2 Válvula de expansión electrónica.

Como se explicó previamente la válvula electrónica disponible para el presente proyecto es una controlada por medio de un motor a pasos unipolar, la empresa encargada de hacer este tipo de válvulas se Fujikoki corporation, esta es una empresa encargada de la construcción de distintos dispositivos para aire acondicionado de vehículos, casas de habitación y otros tipos de inmuebles. Esta empresa es además una de las pocas que vende sus válvulas de expansión electrónica de forma individual, ya que por lo general estas se encuentran incorporadas en sistemas completos y no se venden de forma separada.

Esta fue la primera dificultad para encontrar la válvula de expansión para el proyecto, seguidamente se presentó la dificultad de que la empresa que las construye no tienen ningún tipo de hoja de datos que de las especificaciones de la válvula, solo se tiene un resumen de las características básicas de esta, y es de esta página de información de donde se sabe que la cantidad de pasos son 2000, dando esto una precisión de 0.18° por paso [38].

Una vez que se pudo dar con la información de la cantidad de pasos disponibles dentro de la válvula, se necesitó hacer una investigación para averiguar qué tipo de motor a paso tiene esta, debido a que hay 6 pines de control para la válvula fue posible determinar que esta usa un motor a pasos unipolar de 6 terminales. Determinado esto el siguiente paso fue saber que función tenía cada uno de los pines, existen varias formas de determinar esto, pero se aplicó el método de medir la resistencia entre los pines si esta daba un valor finito se sabía que los dos pines correspondían a la misma bobina dentro del motor, si por el contrario el valor de resistencia daba infinito se determinaba que los pines no correspondían a la misma bobina [39]. Esta prueba fue parte muy importante del desarrollo del sistema en general, debido a que sin estos datos el motor a pasos dentro de la válvula no podría haber sido controlado, ya que una mala conexión de los pines evita el movimiento de la válvula y por lo tanto el paso del flujo de dióxido de carbono hacia dentro de la cámara. Los resultados de esta prueba se muestran en la Tabla 5.2, estas son las relaciones de resistencia entre los pines del motor unipolar, gracias a estos datos es posible conectar la válvula al driver correspondiente y comprobar su funcionamiento básico.

Tabla 5.2 Valores de resistencia entre los pines del motor unipolar.

	Azul	Amarillo	Café	Rojo	Naranja	Blanco
Azul	-	300 Ω	150 Ω	Inf	Inf	Inf
Amarillo	300 Ω	-	150 Ω	Inf	Inf	Inf
Café	150 Ω	150 Ω	-	Inf	Inf	Inf
Rojo	Inf	Inf	Inf	-	150 Ω	150 Ω
Naranja	Inf	Inf	Inf	150 Ω	-	300 Ω
Blanco	Inf	Inf	Inf	150 Ω	300 Ω	-

De los valores de la tabla 5.2 se obtuvo la distribución de pines del motor a pasos dentro de la válvula, en la Figura 5.1 se muestra un diagrama con los colores correspondientes a cada uno de los pines, en esta figura es posible observar como las dos bobinas que componen el motor a pasos están adecuadamente identificadas, y como los pines de tierra son los correspondientes a los colores café y rojo, estos deben de ir conectados juntos para que el motor funcione de forma adecuada.

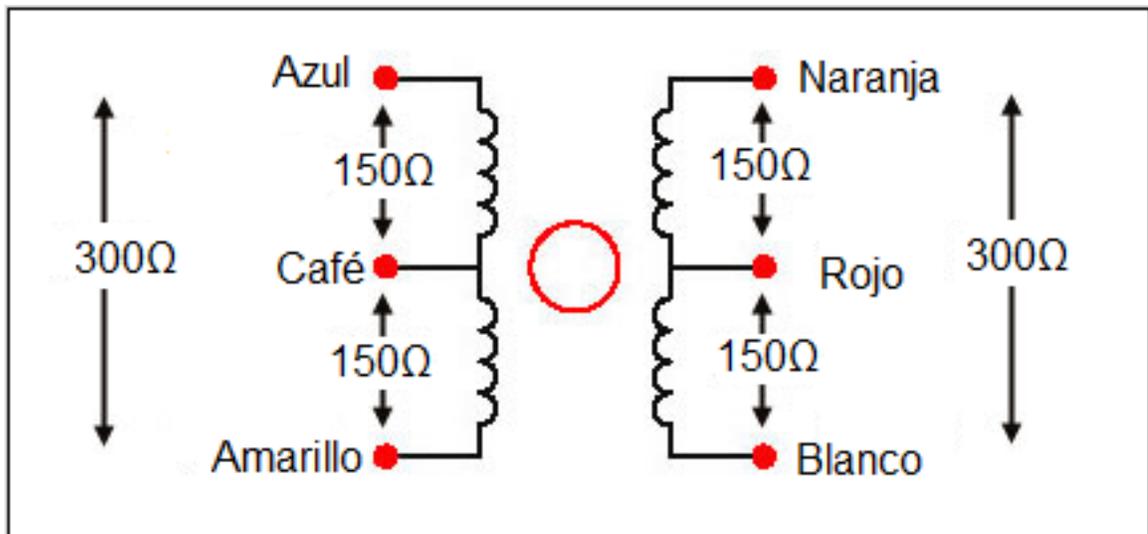


Figura 5.1 Distribución de pines del motor a pasos unipolar.

5.2.3 Driver para motores a pasos unipolares.

Como se describió previamente las válvulas de expansión electrónica se controlan por medio de un motor a pasos unipolar, para poder realizar los movimientos deseados con este tipo de motor es necesario tener un driver, este es un dispositivo que se encarga de dar la tensión necesaria para energizar las bobinas y así poder lograr el movimiento del motor debido a que un microcontrolador no tiene la capacidad de dar la energía suficiente [40]. Teniendo en cuenta esto es posible hacer una descripción del driver a utilizar, se tomó la decisión de usar este debido a que la facilidad para obtenerlo rápidamente y a que su precio es bajo. Este es el driver hecho por la compañía Adafruit, y su nombre es “*Motor Shield V2 for Arduino*” este tiene la particularidad de que se adapta fácilmente al Arduino y este es el disponible para el desarrollo del proyecto. Otras características importantes de este dispositivo es que cuenta con 4 puentes-H, cada uno integrado con un chip TB6612 de forma que cada puente tiene la capacidad de entregar 1.2 A de corriente (3A como máximo por periodos de 20ms), de forma que el driver tiene capacidad de controlar motores que trabajen en un rango de tensión de 4.5V a 13.5V [41].

Este driver tiene además la particularidad de que la empresa que lo fabrica tiene una biblioteca disponible para uso, esta simplifica el uso del driver y permite modificar la posición del motor haciendo solamente de comando en software, para el presente proyecto se decide hacer uso de este recurso, ya que permite una gran versatilidad y precisión a la hora de manejar la válvula. En la Figura 5.2 se muestra un motor a pasos conectado a este driver, como es posible observar este motor es un motor bipolar, ya que tiene solo 4 cables de conexión y no 6 como los unipolares, cuando se realice la conexión de la válvula de expansión electrónica es necesario conectar los dos pines de tierra a la misma entrada en el driver, siendo en este caso la terminal central, esta terminal corresponde a la tierra del sistema y es necesario que las tierras de las bobinas internas del motor estén conectadas a esta para que se activen de en el orden necesario y el movimiento preciso se realice de forma adecuada. Para que el driver funcione al nivel que se desea es necesario conectar un transformador que entregue 12V de tensión para polarizar el sistema adecuadamente.

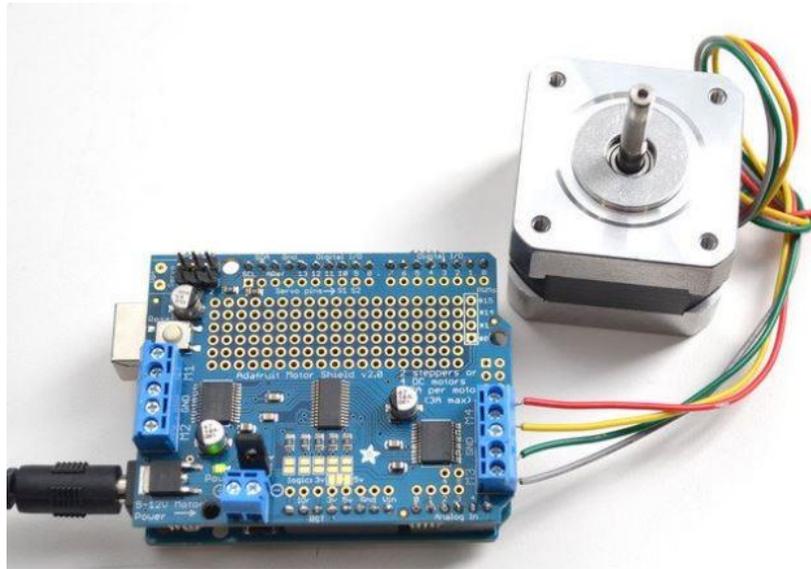


Figura 5.2 Conexión de motor a pasos en el driver. Obtenido de [41].

Finalmente este driver tiene la capacidad de hacer funcionar los motores en cuatro modos: “*single coil*”, “*double coil*”, “*interleave*” y “*microstep*” [41], estos modos de operación tienen que ver con el torque deseado para la aplicación, debido a que el sistema no requiere una gran cantidad de torque, se decide hacer uso del modo “*single coil*” el cual es el que tiene menor consumo de energía y el que desgasta menos el sistema.

5.3 Descripción del software

A continuación se hace una descripción a profundidad de la sección de software del proyecto, esta llevó la mayor cantidad de tiempo en cuanto a diseño e implementación debido a la dificultad de crear algoritmos de comunicación con la correcta sincronización y con la robustez necesaria para correr de forma continua durante semanas completas. Una vez realizada cada una de las partes de software de forma individual el siguiente paso fue integrarlas en una sola interfaz gráfica sencilla de usar y eficiente y que permitiese al usuario iniciar la ejecución del sistema con las variables deseadas, monitorear el avance el ensayo y posteriormente hacer análisis sobre los datos recolectados.

5.3.1 Protocolo de comunicación para el sensor de dióxido de carbono

Para el desarrollo del protocolo de comunicación entre el sensor de dióxido de carbono y el sistema en LabVIEW, se diseñó una máquina de estados, esto para que las instrucciones enviadas salgan al tiempo debido y no interrumpan la sincronización del sistema, en la Figura 5.3 se muestra un diagrama de esta máquina de estados.

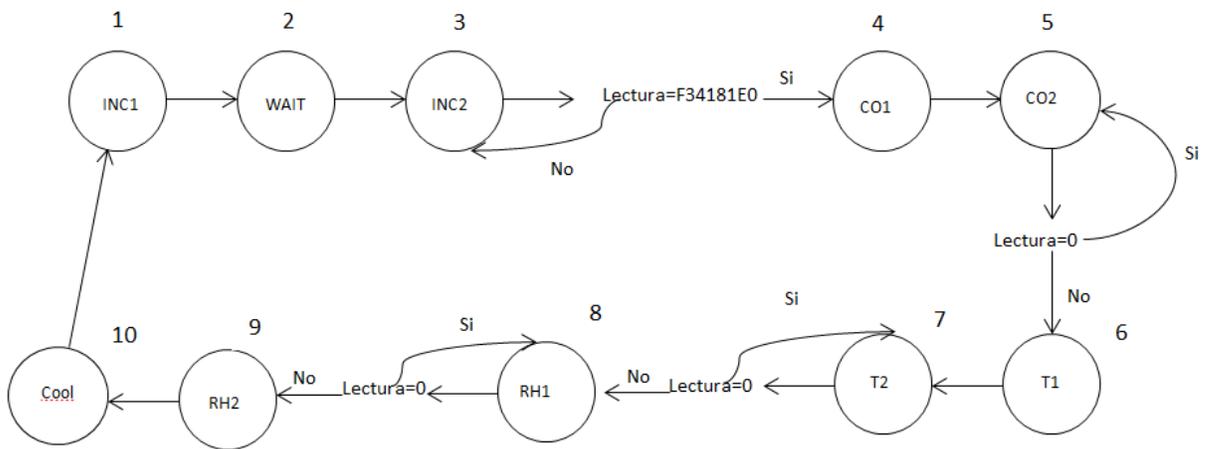


Figura 5.3 Máquina de estados para protocolo de comunicación.

Para el desarrollo de este algoritmo se hizo uso de una serie de herramientas disponibles en LabVIEW, la primera de ellas es la herramienta VISA, esta como se describió previamente es la encargada de abrir el puerto serial para iniciar la comunicación. Una vez que el puerto se abre se procede a enviar la primera instrucción directamente al sensor, esta instrucción se indicó en la Tabla 5.1, la función de esta es indicar al sensor que se desea iniciar una medición, por lo tanto una vez que se envía la instrucción en hexadecimal se deben de dar un tiempo de espera al sensor para este tome la instrucción y empiece la recolección de datos, el tiempo dado al sensor para que este procese dicha instrucción es de 16 segundos, valor indicado por el fabricante del sensor, si no se da este tiempo la lectura será errónea.

Para ilustrar de forma adecuada este proceso, las Figuras 5.4 y 5.5 muestran esta parte del algoritmo diseñado, en estas se observa cómo se abre el puerto serial y como se escriben y leen instrucciones en este. La instrucción se envía por medio de la función de escritura que tiene el sistema LabVIEW haciendo uso del paquete VISA, este permite escribir instrucciones en el formato deseado, en este caso se usa el formato hexadecimal, que es el solicitado por el sensor para poder ejecutar las instrucciones.

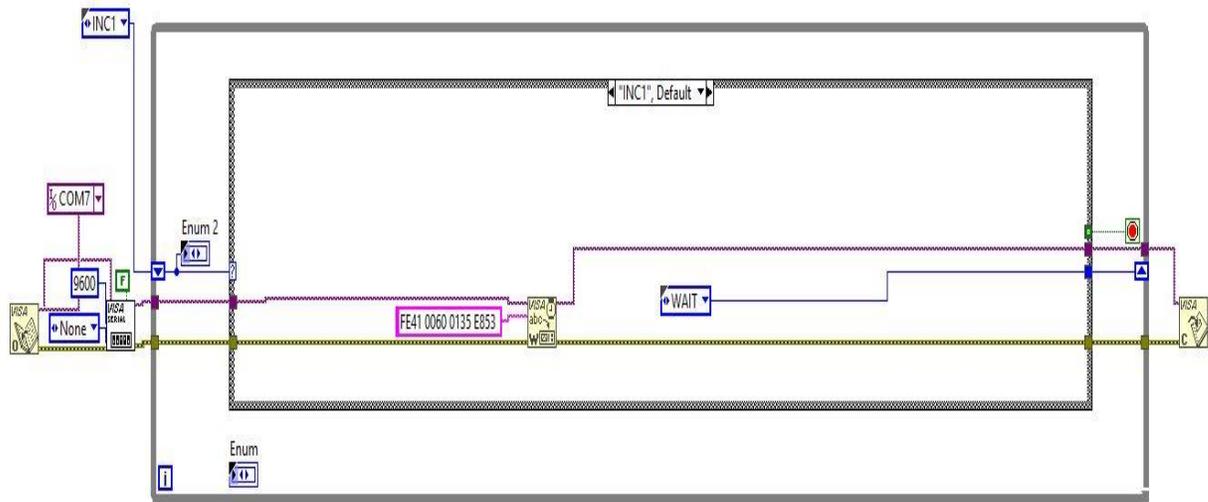


Figura 5.4 Estado inicial para comunicación con el sensor de CO₂

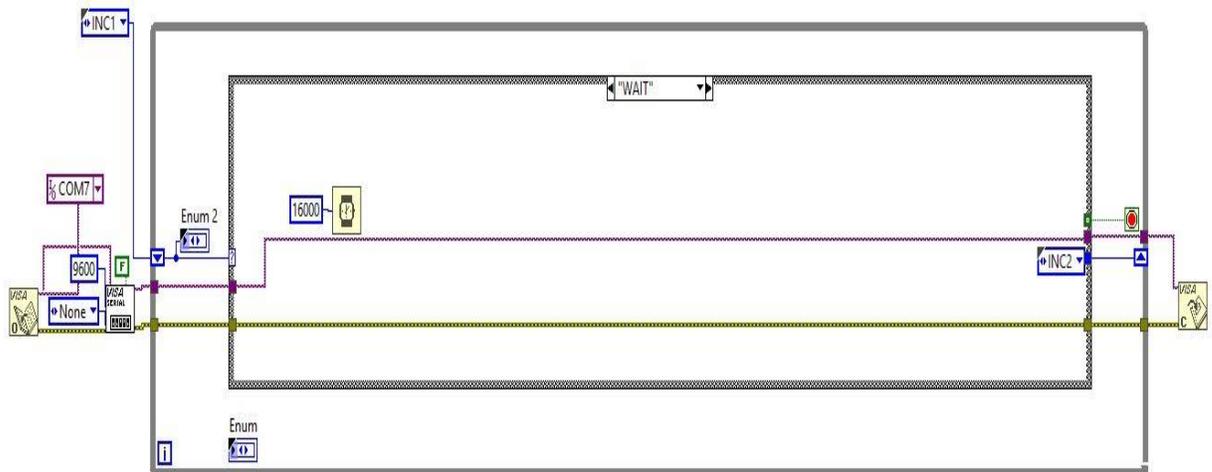


Figura 5.5 Estado de espera para comunicación con el sensor de CO₂

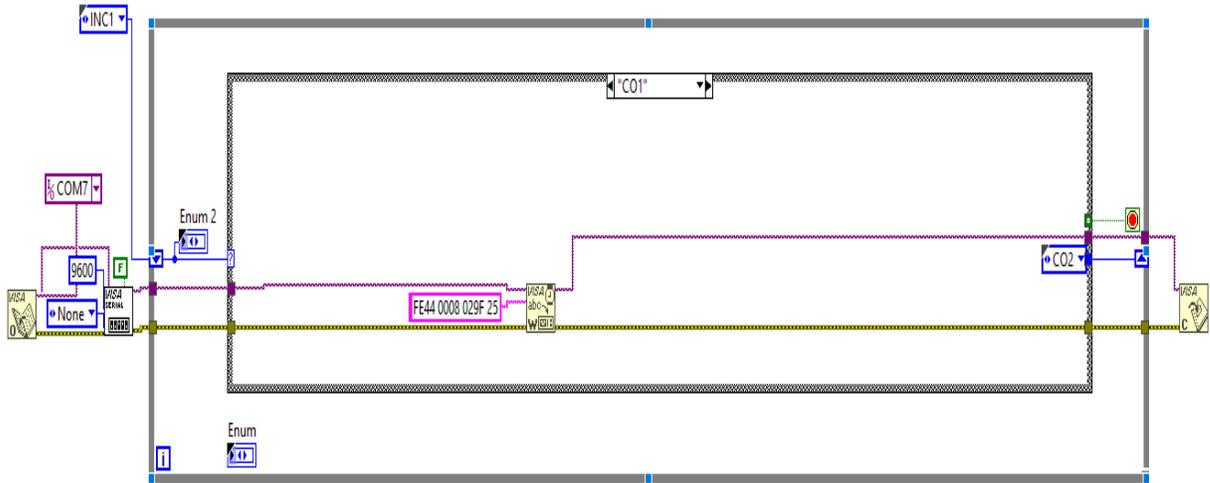


Figura 5.7 Estado de solicitud de valor de CO₂.

Una vez que se da una espera de 500ms se puede abrir el puerto y hacer una lectura, de valor de concentración de dióxido de carbono presente dentro de la cámara, en la Figura 5.8 se muestra este estado con sus demás funcionalidades, como se observa se deben de hacer algunos ajustes al datos realizado antes de poder convertirlo en el valor real de dióxido de carbono.

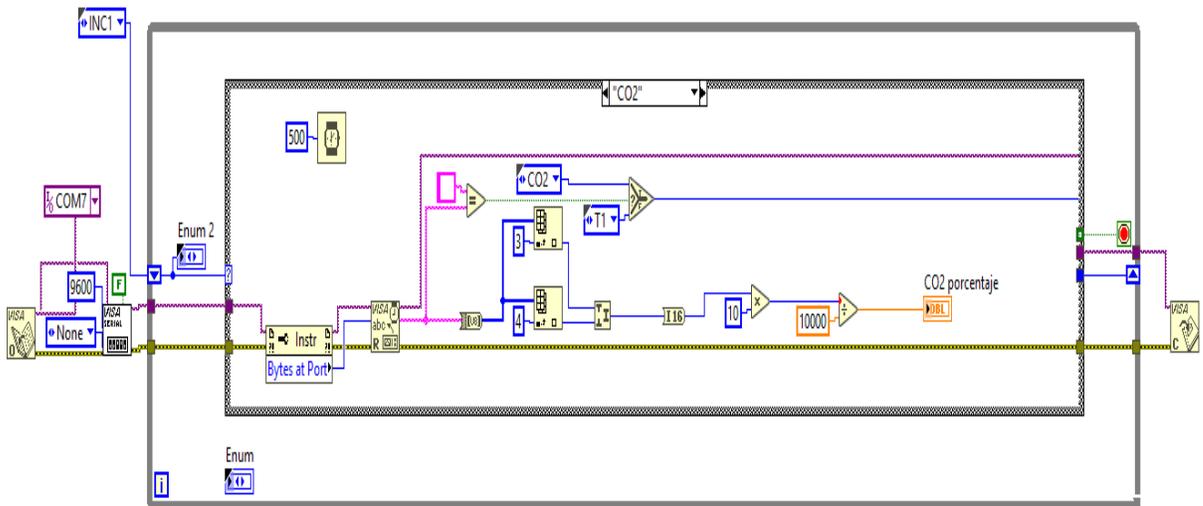


Figura 5.8 Estado de lectura de valor de CO₂.

De la figura es posible observar como primero se debe de configurar una función de lectura para el puerto, ya que es importante leer toda la información que envía el sensor, si bien es cierto la palabra completa incluye información que no necesariamente es importante para el usuario, es necesario verificar que la instrucción llega completa y que se pueden extraer los datos necesario de esta sin incurrir en un error. Posteriormente la palabra leída en el puerto se divide para extraer la información de interés, los valores de concentración de dióxido de carbono se encuentran en los bytes 3 y 4, es por esto que se toman estos dos bytes de información, se separan de la palabra recibida, se vuelven a unir y se convierten a decimal, posteriormente este valor se debe de dividir por 10000, para obtener la concentración de dióxido de carbono de forma porcentual.

Posteriormente sigue un estado de escritura y lectura para la temperatura y humedad relativa, estos cuatro estados son similares a los descritos previamente para la obtención del valor de dióxido de carbono, el único cambio existente en estos estados es la palabra que se envía al sensor, ya que esta es diferente si se quiere obtener temperatura o humedad relativa, las palabras completas necesarias para obtener esta información se encuentran en la tabla 5.1. Finalmente hay un estado de espera para reiniciar el sistema, este espera 5 segundos y reinicia la lectura, este se muestra en la Figura 5.9.

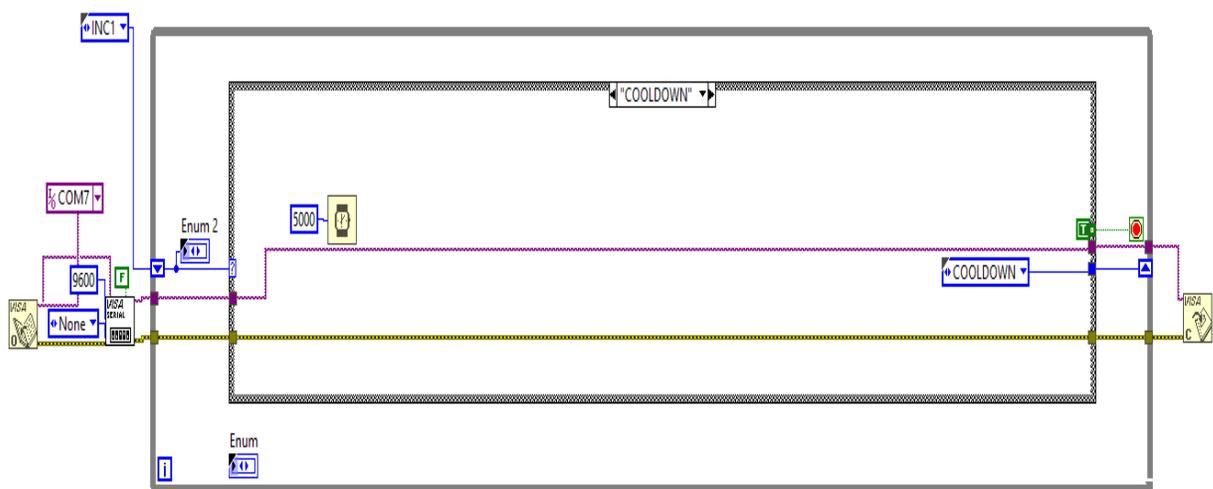


Figura 5.9 Estado final de espera.

5.3.2 Protocolo de escritura para el Arduino

De igual manera que realizó el algoritmo de comunicación para el sensor de dióxido de carbono, se escribió un para la comunicación con el Arduino, este tiene la misma sensibilidad con respecto a la sincronización, por lo tanto se debe de iniciar con una espera de 2 segundos así como lo muestra la Figura 5.10. El estado posterior de escritura se muestra en la Figura 5.11 este se encarga de enviar el valor de dióxido de carbono leído previamente por medio del puerto serial, de forma análoga a las escrituras seriales previamente descritas.

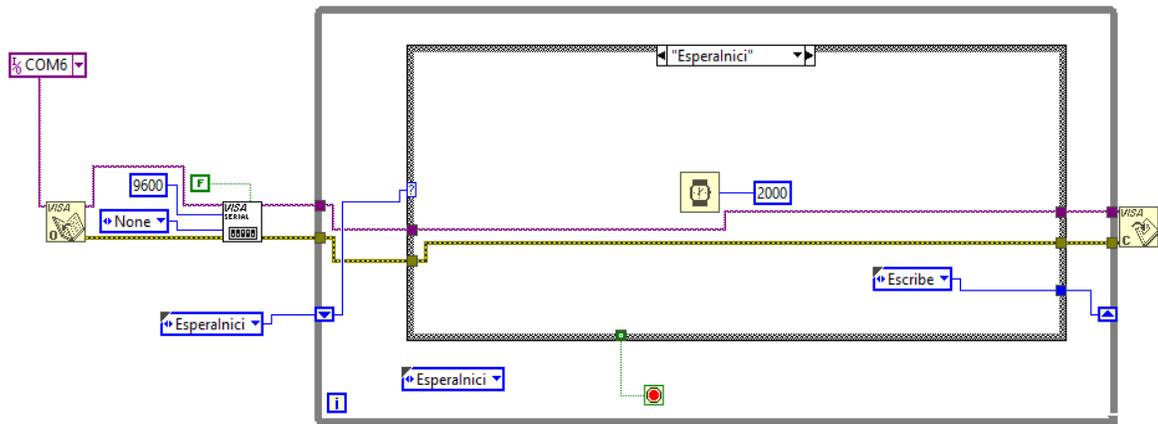


Figura 5.10 Estado de espera inicial de comunicación con el Arduino.

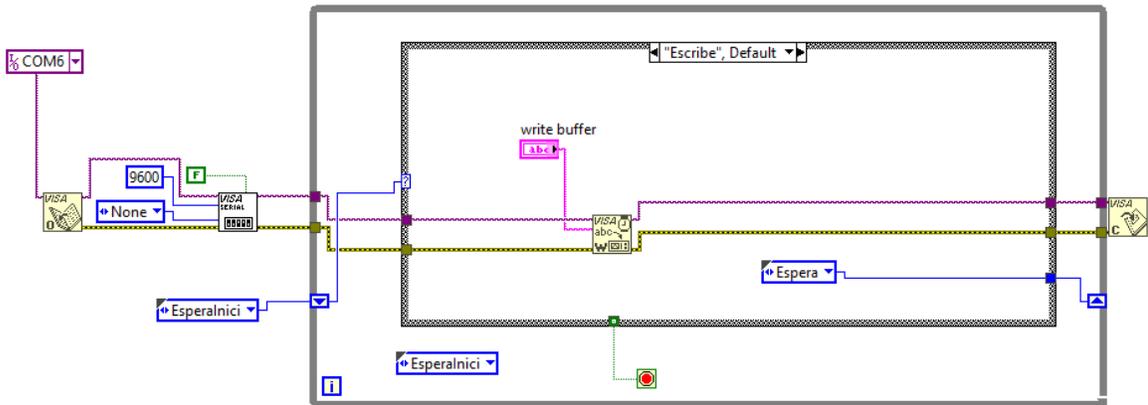


Figura 5.11 Estado de escritura hacia el Arduino.

De esta forma se tienen los dos protocolos de comunicación con periféricos listos, es de vital importancia que ambas funciones de forma correcta, por lo tanto en la sección de resultados se presentan las pruebas realizadas para asegurarse que el protocolo funciona correctamente durante largos periodos de tiempo.

5.3.4 Interfaz de representación gráfica y recolección de datos

Como se mencionó previamente uno de los requisitos del proyecto era tener la facilidad de observar los datos en tiempo real y de guardarlos en una hoja de Excel para su posterior análisis, esto se logra incorporando las dos funciones previas y añadiendo algunas funciones nuevas de LabVIEW. Primero es necesario integrar las dos funciones para que funcionen al mismo tiempo, esto se logra haciendo uso de la técnica de subVI esta consiste en tener las funciones previamente realizadas dentro de una función mayor, la cual será el VI principal. Esto permite integrar diferentes funciones con facilidad y sincronizarlas de forma correcta [42].

Una vez que integran las dos funciones descritas previamente, se debe de implementar un sistema que permita graficar en tiempo real LabVIEW ofrece la posibilidad de hacer gráficos 2D haciendo uso de una función predeterminada, esta presenta además la posibilidad de modificar el aspecto del gráfico según sea necesario. De esta se crea una de estas funciones para cada una de las variables a graficar, ya que estas se entienden de forma más sencilla si se grafican independientemente.

Posteriormente es necesario que el sistema tenga la posibilidad de guardar los datos de medición de todo el ensayo para que estos se puedan analizar cuando sea necesario, esto se logra haciendo uso de la función de LabVIEW que permite hacer archivos de medición, esta función tiene la capacidad de escribir en una hoja de Excel la hora a la cual se obtuvo el dato y el valor del mismo, además permite escribir datos de múltiples variables en la misma hoja sin necesidad de crear más de un documento. Finalmente es necesario que el sistema tenga la capacidad de permitir al usuario ingresar el valor deseado de concentración final de dióxido de carbono, por lo tanto se habilita un indicador numérico en el cual el usuario ingresa el valor que desea y el sistema lo toma como referencia para el ajuste del dióxido de carbono.

La función descrita previamente se muestra en la Figura 5.12, antes de poder escribir los datos haciendo uso de la función de escritura de archivos de medición, es necesario unir las variables a escribir de forma que estas se escriban de forma individual y en columnas distintas.

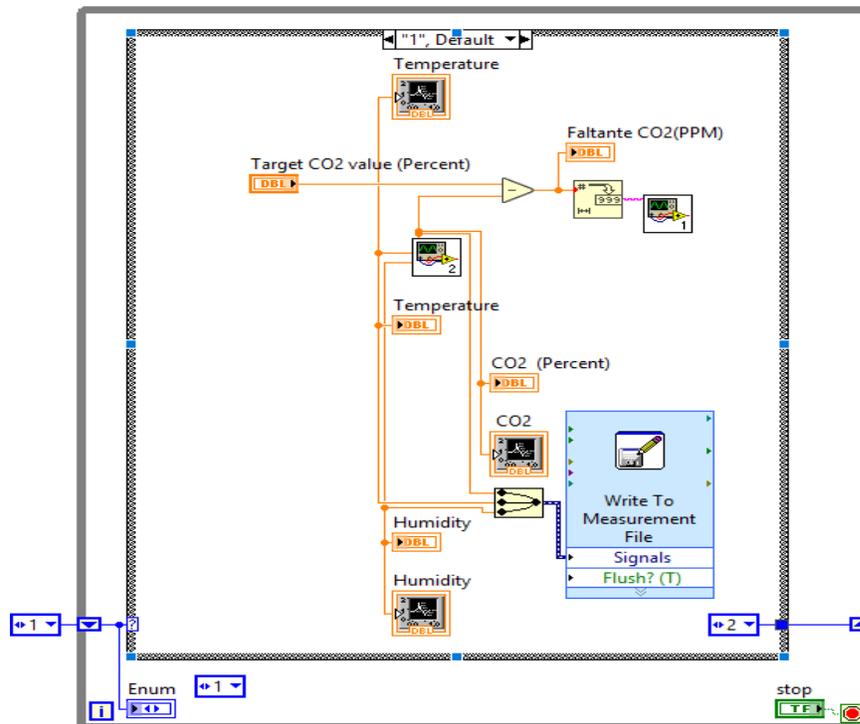


Figura 5.12 Función para graficar y escribir datos en una hoja de Excel.

Finalmente se debe de diseñar una interfaz gráfica para el sistema, esta se construye tomando las necesidades del proyecto explicadas previamente, la interfaz debe de ser funcional y debe de integrar todas las mediciones que se van realizando conforme el ensayo va avanzando ya que es de vital importancia observar la evolución de las variables dentro de la cámara, como la humedad relativa y la temperatura, además es necesario que el usuario pueda observar que el valor de la concentración de dióxido de carbono se mantiene en constante según el valor deseado y en caso de ser necesario se debe de poder hacer un ajuste a este valor sin interrumpir el ensayo que se esté llevando a cabo, esta interfaz se muestra en la Figura 5.13

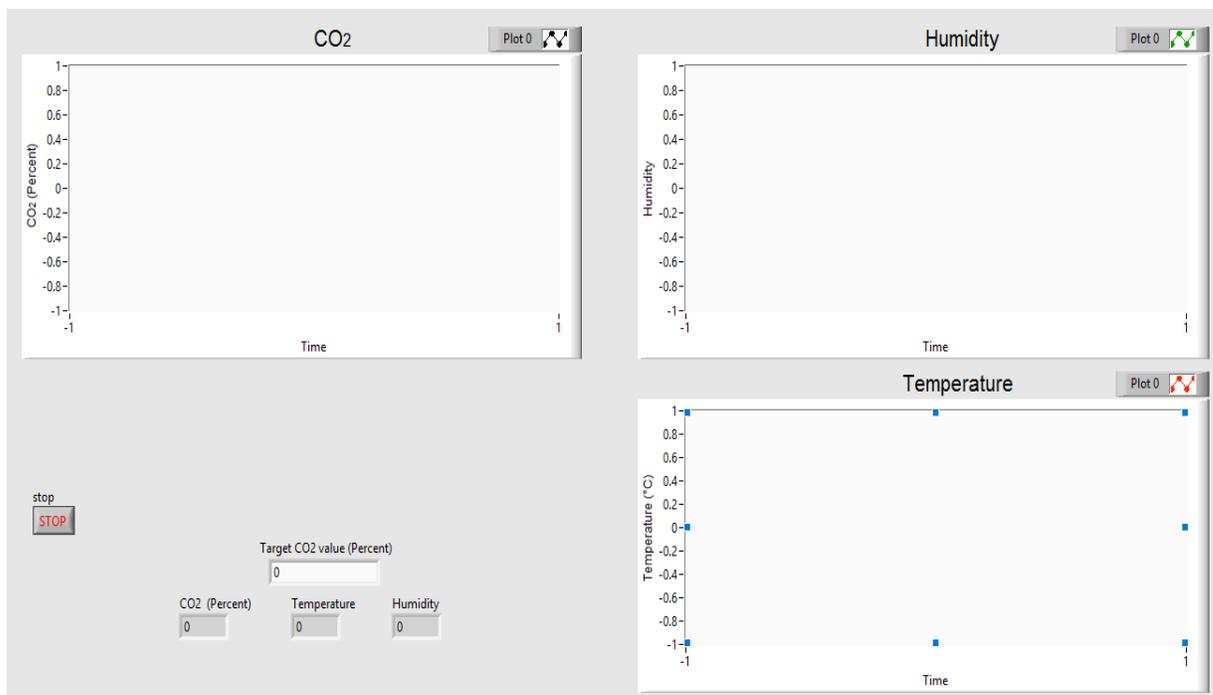


Figura 5.13 Interfaz gráfica del sistema de carbonatación

5.3.4 Control de la válvula de expansión electrónica

Finalmente con los datos generados previamente se envía la instrucción al Arduino para que este ajuste la válvula de expansión electrónica según sea necesario, el ajusta será realizado con un control proporcional, de acuerdo a la referencia que envía el programa de LabVIEW, el control se realizó para que funcione en un rango de 0 a 30% de dióxido de carbono, ya que este es el valor máximo que se va a utilizar en los ensayos dentro del laboratorio. La primera sección código consiste en la configuración del motor para el driver, se debe primero crear el objeto y posteriormente indicar en cuál de los puertos este se encuentra conectado, después es necesario indicar la frecuencia a la cual se quiere operar el motor, esta viene predeterminada en un valor de 1.6kHz. Una vez que se tiene esta configuración básica es necesario indicar la velocidad deseada para el motor, debido a que la aplicación no requiere un movimiento brusco del motor, sino un movimiento controlado y preciso esta velocidad se fija como 10 rpm, estos pasos de configuración se muestran en la Figura 5.14.

```

#include <Wire.h>
#include <Adafruit_MotorShield.h>
#include "utility/Adafruit_MS_PWM_ServoDriver.h"
//Crear objeto para la biblioteca
Adafruit_MotorShield AFMS = Adafruit_MotorShield();
// Conectar a puerto 2 del driver (M3 Y M4)
Adafruit_StepperMotor *myMotor = AFMS.getStepper(2000, 2);
void setup(){

  Serial.begin(9600);
  AFMS.begin(); // Iniciar objeto con frecuencia de 1,6KHz(predeterminado)
  myMotor->setSpeed(10); // velocidad de rotacion del motor

void loop(){
if (Serial.available() > 0){ ///Esperar que haya algun valor en el Buffer
float val = Serial.parseFloat();
if (val!=0){
  //Serial.print(val);
  ponerpinalto(val);
}
else{
}
}
else { ///Si el buffer esta vacio no realiza ninguna accion
  Serial.print("Nada que leer");
}
}
}

```

Figura 5.14 Configuración del driver desde el Arduino

Posteriormente se inicia el código para lectura, primero se abre un buffer de lectura serial, el cual es monitoreado de forma constante para determinar si hay algún valor que leer en el puerto, una vez que se detecta un valor, este se compara con cero, si es diferente se guarda el valor y se envía a una función posterior llamada “ponerpinalto”, esta se encarga de enviar la instrucción para regular la válvula, por el contrario si el valor es igual a cero, se continua leyendo sin ejecutar ninguna otra función. Cuando un valor es enviado a la función previamente mencionada esta se encarga de crear el ajuste basado en este valor como referencia, debido a que el sistema funciona con un ajuste lineal, se toma el valor, se multiplica por una constante predeterminada y se envía la instrucción a la válvula para que se mueva esa cantidad de pasos. La cantidad de pasos para moverse depende de la referencia leída en el puerto serial. Esta sección del código se muestra en la Figura 5.15.

```

int ponerpinalto(int resultado){

    if(resultado>0){ //
    int mov= resultado*80;
    Serial.println(mov);
    myMotor->step(mov, BACKWARD, SINGLE);///Backward abre la valvula
    timeLoop(millis(), 4000);
    myMotor->step(mov, FORWARD, SINGLE);
    }
    else {
    Serial.println(resultado);
    }
}

void timeLoop (long int startMillis, long int interval){ ///Funcion para conteo entre movimientos de la válvula
    while(millis() - startMillis < interval){
    }
}
}

```

Figura 5.15 Control de la válvula desde el Arduino

Una vez que se envía la instrucción de apertura a la válvula, se espera una cantidad determinada de tiempo con la válvula abierta y esta posteriormente se cierra, este tipo de ajuste es necesario debido a la cantidad limitada de dióxido de carbono disponible para el experimento, además debido al volumen de la cámara es no es necesario ingresar una cantidad muy grande de dióxido de carbono para cambiar la concentración interna. Para lograr que esta espera fuese constante se hizo una función aparte para que esta se encargue de detener el programa por el tiempo indicado y una vez que este se acabe renovar la ejecución del programa.

CAPITULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se presentan los resultados más relevantes a la hora de implementar el proyecto, esta sección se elabora enfocada al funcionamiento del sistema electrónico diseñado, y no a la capacidad de la cámara para carbonatar, ya que el proyecto tenía preparar las condiciones para el sistema trabajara de forma precisa.

6.1 Resultados

A lo largo del desarrollo del proyecto se realizaron una serie de ensayos para lograr determinar el adecuado funcionamiento del sistema diseñado, primero es necesario mostrar como se ve el sistema en funcionamiento, y como este grafica los valores de dióxido de carbono, humedad relativa y temperatura obtenidos. En la Figura 6.1 se muestra la interfaz gráfica durante una medición de variables sin control de dióxido de carbono, el valor deseado se deja en cero para no modificar la concentración dentro de la cámara. En esta figura es posible observar como el sistema muestra los valores obtenidos a lo largo del tiempo y el último valor obtenido, la casilla de valor deseado de CO₂ se dejó en blanco para no alterar la concentración durante este ensayo ya que este se trataba solo de una medición de humedad para observar su variación en el tiempo.

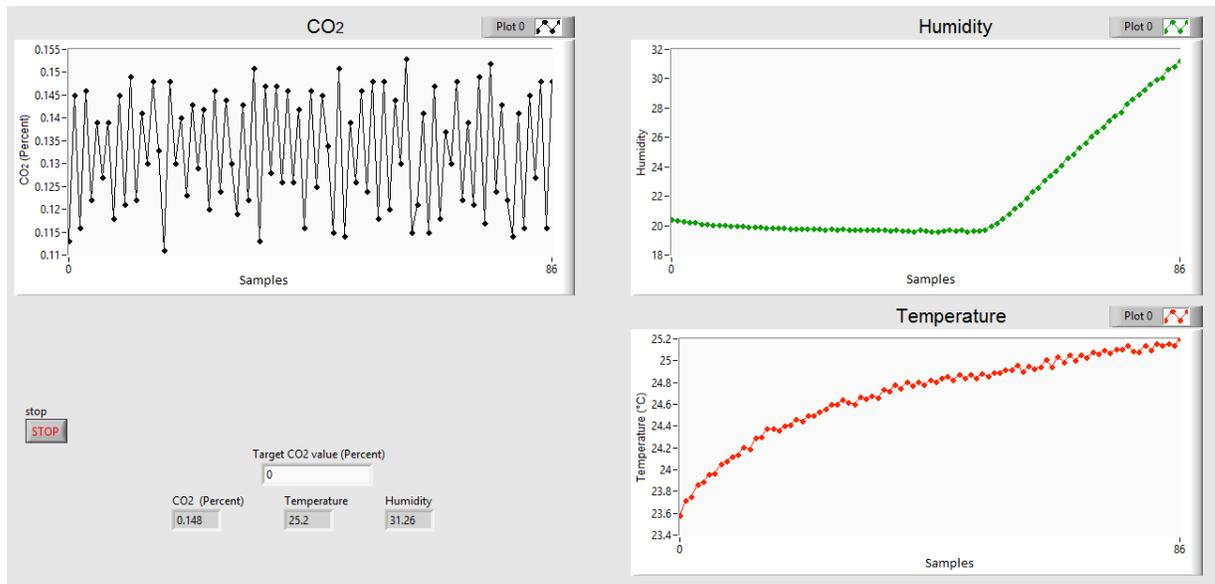


Figura 6.1 Interfaz gráfica del sistema durante una medición

La primera prueba de importancia que fue necesario ejecutar una vez se diseñó el protocolo de comunicación, fue que este estuviera en la capacidad de mantener su funcionamiento durante un periodo extendido de tiempo, en este caso se diseñó una prueba de 28 horas consecutivas durante la cual el algoritmo se encargó de recolectar los datos de dióxido de carbono, temperatura y humedad relativa, estos valores fueron guardados en una hoja de Excel para su posterior análisis, en la Figura 6.2 se muestran los valores recolectados por el sensor para la humedad relativa, en el anexo B1 se despliega una muestra significativa de los valores medidos por el sistema.

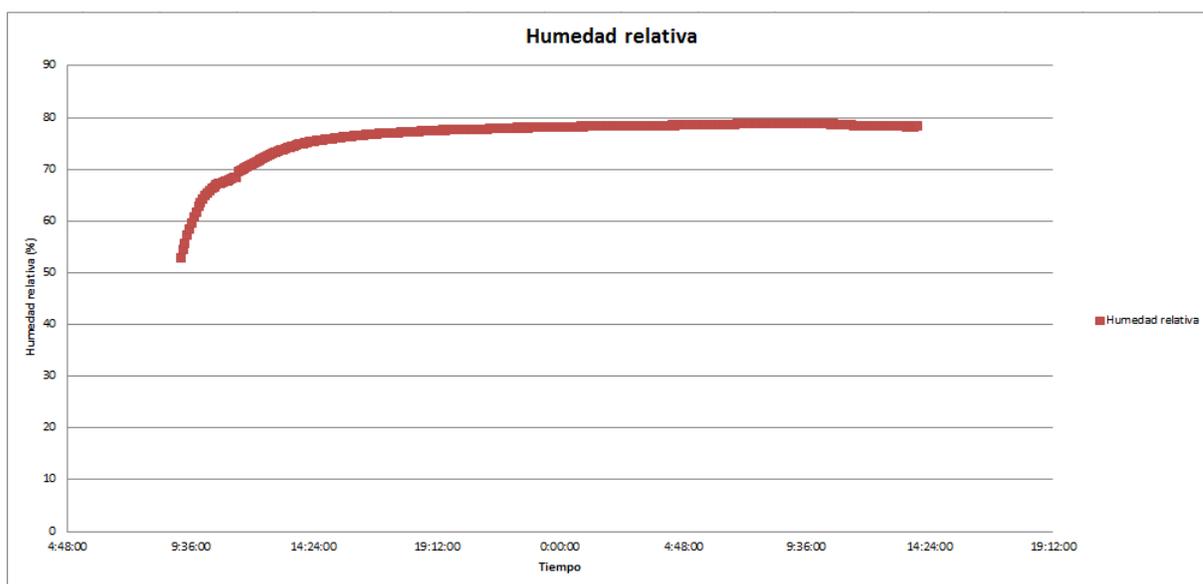


Figura 6.2 Resultados de prueba de humedad de 28 horas.

Posterior a esta prueba de funcionalidad del sistema de medición de datos, se procede a realizar un ensayo para determinar la precisión del sistema realizado a la hora de recolectar los datos de las variables en cuestión. Para lograr esto es necesario tener un valor de referencia para las variables, esto se logra haciendo uso de un sistema diseñado por el fabricante, este software llamado GasLab cuenta con una interfaz para poder realizar mediciones con el sensor y guardar estos datos [43], de esta forma fue posible poner ambos sistemas a funcionar al mismo tiempo y obtener los porcentajes de error para cada una de las variables medidas.

A continuación se muestran los resultados de medición para la variable de dióxido de carbono, en la Figura 6.3 se muestra gráfico de los valores obtenidos con el sistema diseñado y en el mismo gráfico los valores obtenidos con el sistema hecho por el fabricante. Con estos datos se obtiene un porcentaje de error, se obtiene un porcentaje de error para cada una de las mediciones y posteriormente se hace un promedio del error de todos los datos. La tabla completa con todos una muestra significativa de los datos de este ensayo se encuentra en el anexo B1.

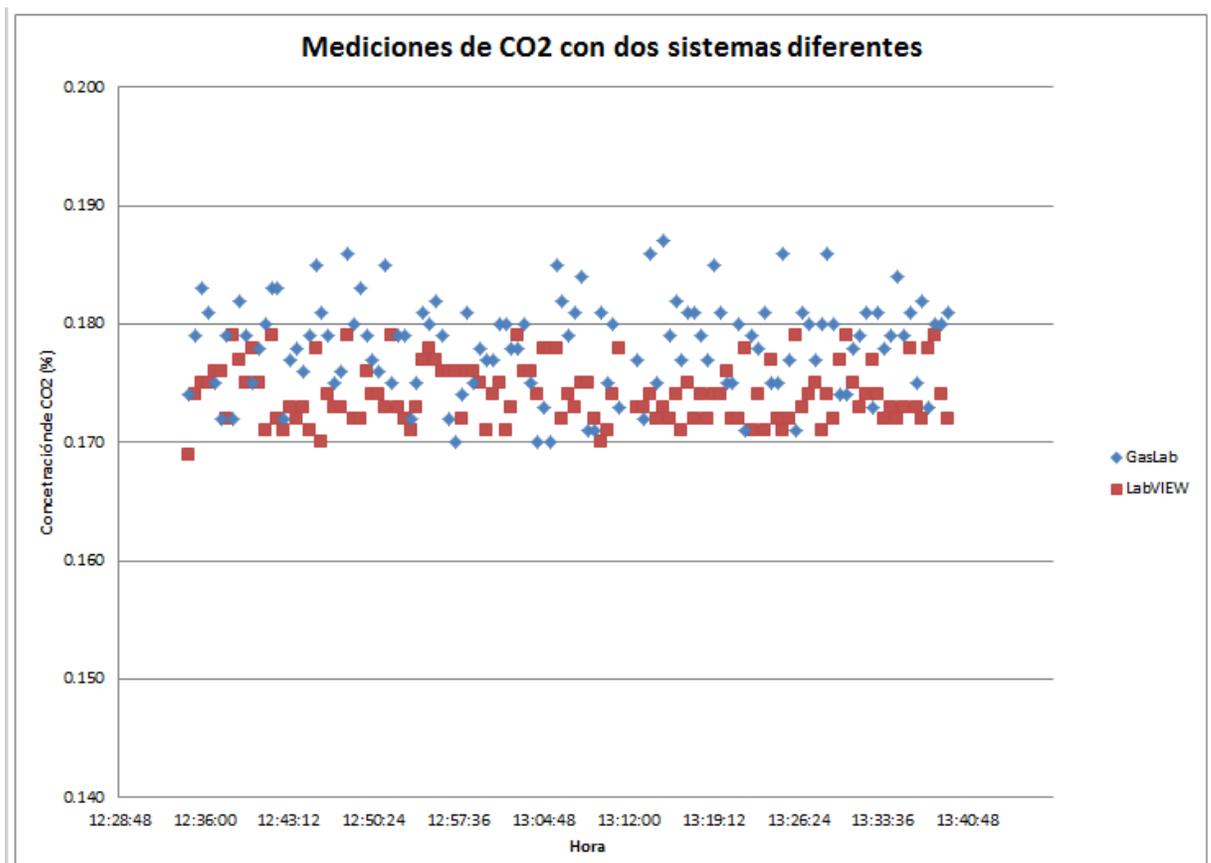


Figura 6.3 Resultados de dióxido de carbono con dos sistemas diferentes

En la Figura 6.4 se muestran las mediciones de temperatura realizadas con el sistema diseñado y con el sistema del fabricante, haciendo uso de estos datos se calcula un porcentaje de error para cada medición y posteriormente se calcula un promedio de estos porcentajes de error para hacer un análisis y determinar si este es un valor adecuado.

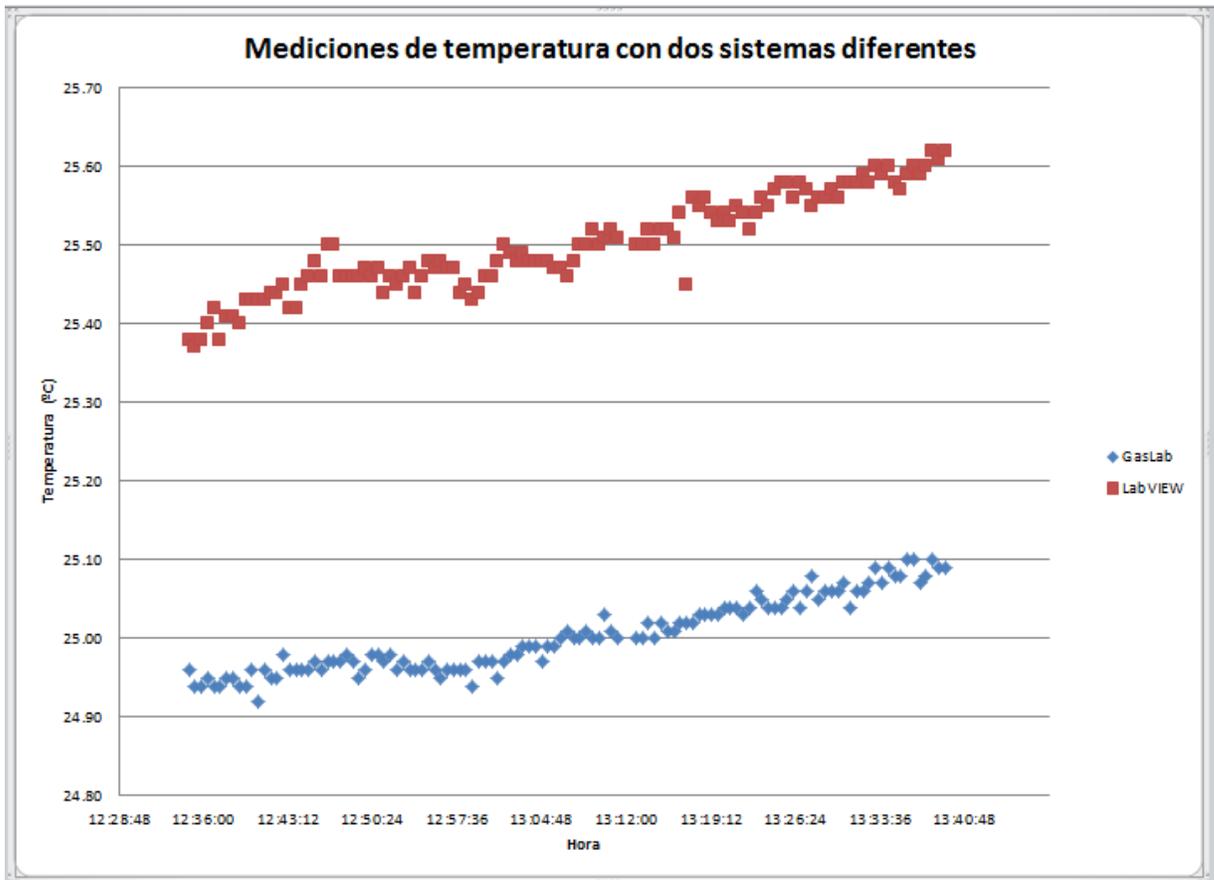


Figura 6.4 Resultados de temperatura con dos sistemas diferentes

De la imagen previa es posible observar la tendencia de los datos tanto en el software del fabricante (GasLab) como en el algoritmo diseñado para el proyecto, estos valores son de gran importancia para el análisis realizado, este se presenta en la siguiente sección.

Posteriormente se realiza la misma representación gráfica descrita previamente pero para la última variable del sistema, siendo esta la humedad relativa, los resultados obtenidos por medio de GasLab y los resultados obtenidos por medio del sistema de medición diseñado para el proyecto se muestran en la Figura 6.5. Al igual que para las series de datos anteriores se calcula un porcentaje de error para cada dato y se obtiene el promedio de estos porcentajes de error, a la hora de evaluar la eficiencia del diseño estos datos son los que se deben de tomar en cuenta para determinar si el sistema cumple con los requisitos establecidos previamente y si es suficientemente preciso.

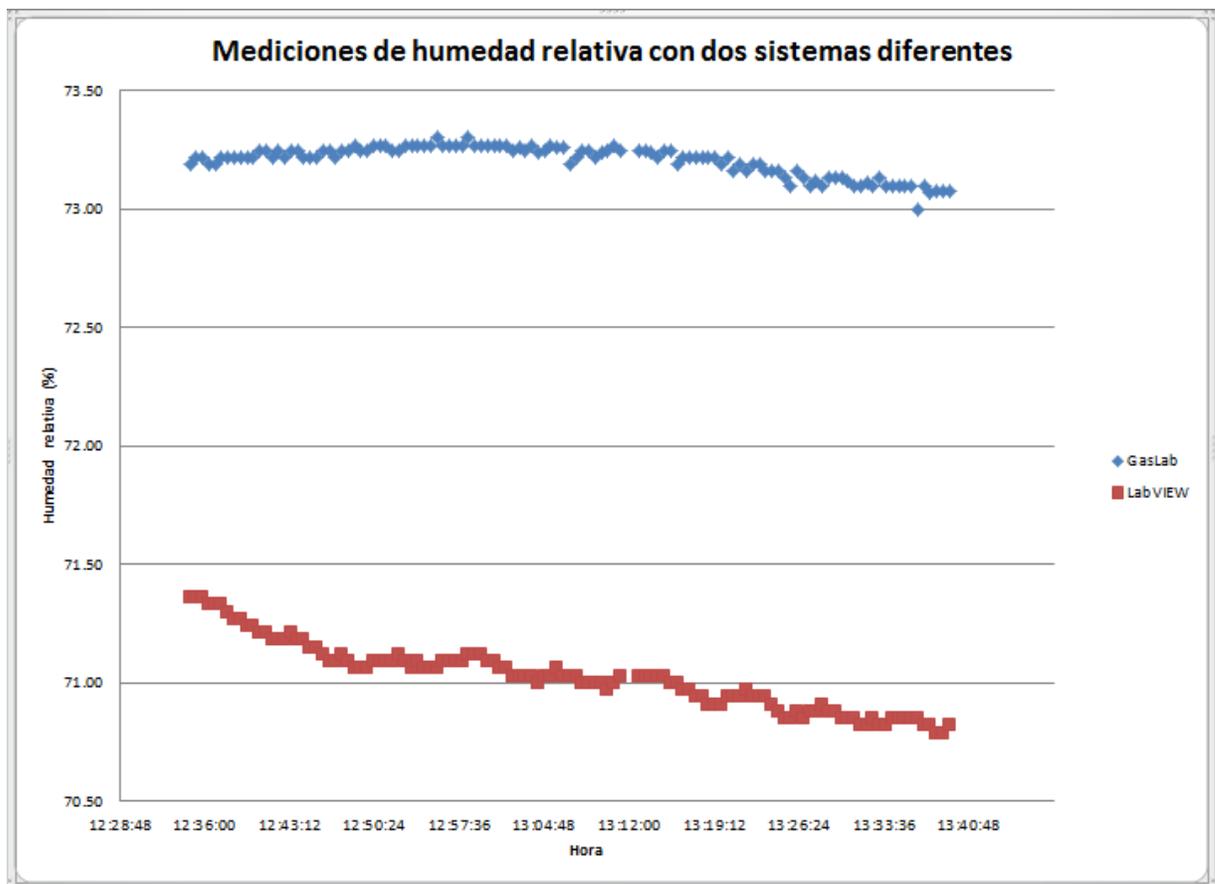


Figura 6.5 Resultados de humedad relativa con dos sistemas diferentes

Una vez ilustrados todos los datos y sus diferencias es necesario como se mencionó previamente calcular los porcentajes de error y sus promedios, estos valores se muestran en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1. Valores promedio de porcentajes de error.

<i>Variable</i>	<i>Promedio de porcentaje de error</i>
<i>Concentración de CO₂ (%)</i>	3.15
<i>Temperatura (°C)</i>	1.99
<i>Humedad relativa (%)</i>	2.98

Posteriormente se conduce un ensayo controlado con dióxido de carbono, esto para probar que el sistema llega al valor que indica el usuario y que este valor se mantiene constante durante el periodo de tiempo necesario, en la Figura 6.6 se muestra el resultado de este ensayo, el valor deseado para el experimento mostrado a continuación era de un 12%.

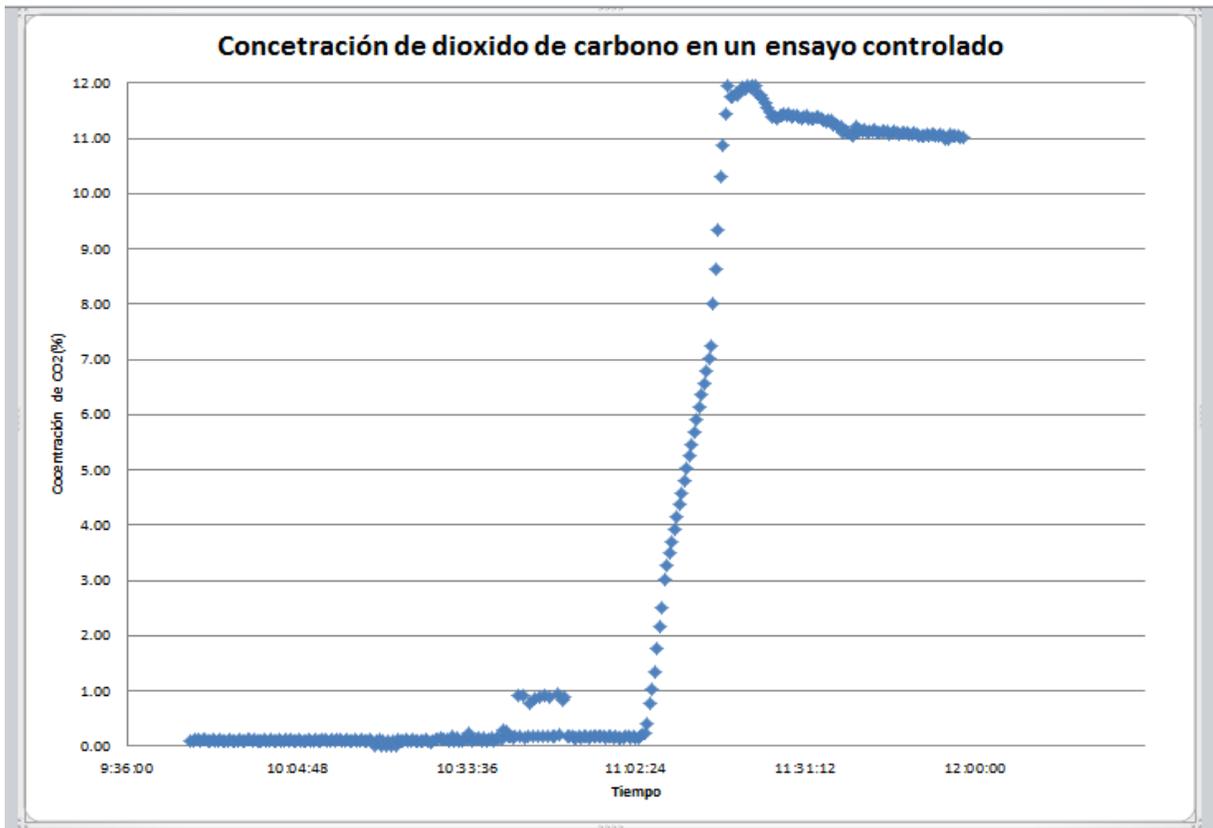


Figura 6.6 Resultados de ensayo controlado de dióxido de carbono.

En el anexo B1 se despliega información de este ensayo, debido a la gran cantidad de puntos obtenidos, solo se muestra una parte significativa de los valores obtenidos por medio de este ensayo con estos valores es posible observar la tendencia del sistema y el punto en el cual se encuentra en un valor estable alrededor del valor definido previamente por el usuario por medio de la interfaz gráfica integrada dentro del sistema.

Finalmente se conduce un experimento final para observar el comportamiento del sistema durante un ensayo real de carbonatación, este ensayo se realizó con una concentración de 20% y se realizó durante un periodo de dos horas, en la Figura 6.7 se observa la tendencia de los datos para este ensayo. En el anexo B1 se encuentra una tabla con los valores más significativos del experimento mostrado a continuación.

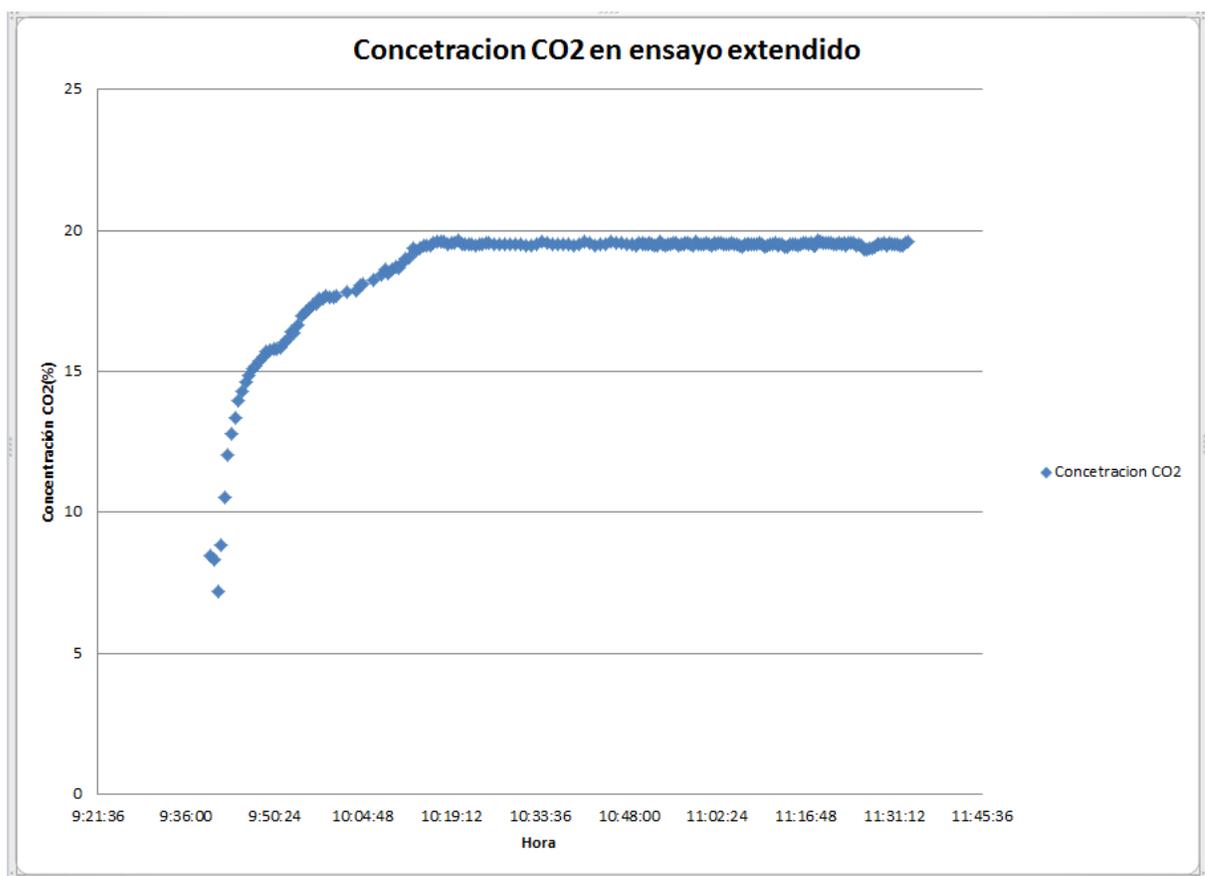


Figura 6.7 Resultados de ensayo de carbonatación.

6.2 Análisis

Tomando en cuenta los resultados expuestos en la sección previa es necesario que estos se analicen, ya que si una explicación acerca de la obtención y la relevancia de los mismos es resulta muy complicado lograr un entendimiento del proyecto en su totalidad. Primero se va a realizar un análisis de los datos expuestos en la Figura 6.2, como se mencionó previamente este gráfico corresponde a los datos obtenidos durante un ensayo de medición de 28 horas seguidas, es importante destacar que esta fue la primera prueba con una verdadera relevancia para el proyecto, ya que es necesario que el algoritmo de recolección de datos diseñado se mantenga funcionando sin ningún tipo de error durante periodos de tiempo indefinidos. Es decir si se decide hacer un ensayo de carbonatación de 2 meses consecutivos, el sistema diseñado debe de estar en capacidad de mantenerse funcionando durante este periodo seguido sin interrupción.

Por esta razón se decide hacer este ensayo de 28 horas, si bien es cierto esta cantidad de tiempo puede parecer muy baja comparada con la cantidad de tiempo que llevan los ensayos de carbonatación, es suficiente para corroborar un funcionamiento adecuado del sistema. Como es posible observar de la Figura 6.2, el sistema mantuvo su funcionamiento de forma constante durante toda la duración del ensayo, este se configuró para que tomara datos cada 5 minutos, se guardaron datos de concentración de dióxido de carbono, temperatura y humedad relativa, pero solo se graficaron los de humedad para mostrar la tendencia que esta variable tiene en el tiempo.

De esta forma este ensayo prologando comprobó el adecuado funcionamiento del protocolo de comunicación diseñado y a la vez permitió observar el comportamiento de la humedad relativa dentro de la cámara. Es importante poder obtener datos de este valor de humedad debido a que como se explicó previamente el fenómeno de carbonatación requiere de un valor de humedad elevado para poder difundirse de forma adecuada, es necesario que este valor esté por encima de un 60%, ya que si la humedad en la estructura porosa del concreto es menor no se puede dar la difusión del dióxido de carbono y por lo tanto no puede darse carbonatación a profundidades importantes dentro de las probetas de concreto reforzado con acero.

Posteriormente se diseñó para determinar la incertidumbre de medición del sistema diseñado, para lograr esto se hizo uso de un software diseñado por la empresa fabricante del sensor, este software lleva el nombre de GasLab, y permite hacer mediciones de concentración de dióxido de carbono, temperatura y humedad relativa. Este software está diseñado para trabajar con una amplia gama de sensores fabricados por esta empresa, incluido el sensor k33-BLG que es el sensor usado para el proyecto. Por lo tanto como este software es diseñado por el fabricante, los datos entregados por este se toman como los valores de referencia a la hora de hacer los cálculos de error. En las Figuras 6.3, 6.4 y 6.5 se observa el comportamiento de las dos series de datos siendo la de color rojo la correspondiente al sistema diseñado para el proyecto y la azul la correspondiente al software GasLab.

Primero es necesario analizar la Figura 6.3, esta contiene los valores leídos para la concentración de dióxido de carbono, es importante destacar que al realizar estas mediciones se tiene como valor deseado de dióxido de carbono un 0% esto para poder hacer mediciones de fondo, es decir mediciones con la concentración dentro de la cámara sin ser alterados por un flujo de CO₂ externo. Al no tener un flujo externo de CO₂ la concentración dentro de la cámara es muy baja, el máximo valor alcanzado por esta durante el ensayo no supera el 0.19% lo cual es lo esperado para un ambiente no contaminado. Al observar la figura destaca el hecho de que las mediciones de concentración no siguen un patrón determinado, es decir no tienen una tendencia a crecer o a decrecer, este es el comportamiento esperado para mediciones de concentración de CO₂ en un medio sin un control.

Debido a que las mediciones de concentración no tienen una tendencia determinada es complicado observar la diferencia de los valores medidos con los dos sistemas diferentes haciendo uso solo de la figura, es por esto que se procede a hacer un cálculo de porcentaje de error para cada dato medido, posteriormente se obtiene el promedio de todos los porcentajes de error calculados. El valor de porcentaje de error para esta variable es de un 3.15%, este porcentaje de error es aceptable para el tipo de sistema diseñado, ya que no existe un sistema previo que permita tener una idea de cuál será este error en la medición del sistema, uno de los objetivos del presente proyecto era determinar de forma exacta cuál era la incertidumbre en la medición de las variables involucradas en el proceso de carbonatación.

El análisis de las figuras 6.4 y 6.5, las cuales corresponden a los valores de temperatura y humedad relativa respectivamente, es más sencillo debido a que con la ayuda de las figuras se puede observar como existe una tendencia en las mediciones. Es posible observar como la figura 6.4, la cual contiene los datos de temperatura muestra una clara tendencia a aumentar, esta tendencia se mantiene para las dos series de datos, la obtenida con el sistema de referencia y obtenida con el sistema diseñado. Este patrón se mantiene en la figura que contiene los datos de humedad relativa, ya que las dos figuras presentan una tendencia al decrecimiento. Si bien es cierto en las dos figuras se nota una diferencia entre el valor medido y el valor de referencia, el hecho de que la tendencia de ambas respete la tendencia del valor de referencia es importante ya que esto respalda el sistema de medición diseñado.

Posteriormente se debe de hacer un cálculo del promedio de los porcentajes de error al igual que se hizo con la variable de dióxido de carbono, para la temperatura este porcentaje de error tiene un valor de 1.99% y para la humedad relativa el porcentaje de error es de un 2.98%. Como se mencionó previamente un objetivo del proyecto era determinar la incertidumbre de medición de variables, esto toma importancia si se considera que no existe un sistema previo a este, es decir a la hora de diseñar los algoritmos de medición, no se sabía con qué precisión estos iban a funcionar. Es por este motivo que los porcentajes de error en las mediciones de las tres variables de interés se aceptan, incluso se consideran buenos, ya que ninguno de ellos supera un 4% y este es un número muy bueno para ser la primera versión del sistema que se diseña.

Seguidamente es necesario hacer un análisis de la información mostrada en la Figura 6.6, estos valores corresponden a un ensayo controlado de dióxido de carbono, es decir un ensayo en el cual se puso un valor definido de dióxido de carbono y se alcanzó la estabilidad del sistema alrededor de este. Para este caso el valor definido fue de un 12%, no se usó un valor más elevado debido a que en estos ensayos consumen una cantidad considerable de gas, y hay disponible una cantidad limitada para hacer los ensayos de carbonatación. Con este valor fijado el sistema empieza su funcionamiento y este se deja correr con un flujo fijo en la válvula del balón de dióxido de carbono, este valor no se debe de modificar a lo largo del experimento ya que afectaría el comportamiento del sistema de control.

De esta figura es posible observar la tendencia de la concentración de dióxido de carbono dentro del sistema, en la primera mitad del experimento se observan como los valores son constantes y menores a 1%, este se hizo para lograr una estabilidad dentro del sistema antes de empezar el ensayo con el control del dióxido de carbono. Una vez que el sistema se pone en funcionamiento es posible observar como el valor de dióxido de carbono aumenta de forma lineal, hasta alcanzar un valor de 11.95%, este es el máximo valor que se permite que el sistema alcance. Como se explicó previamente el sistema realiza una apertura de la válvula de acuerdo a la referencia que reciba, si recibe una instrucción de valor faltante menor a un 1%, el desplazamiento de la válvula va a ser mínimo, es por esto que el sistema tiene la capacidad de regular la variación de dióxido de carbono de forma fina y mantenerla en un rango deseado, en este caso el sistema se mantiene siempre en un valor mayor a un 11%, de forma que se considera que el sistema funciona de forma exitosa.

Por último se toman los datos generados por el sistema durante un ensayo de carbonatación, estos valores se muestran en la Figura 6.7, de esta es posible observar la tendencia de crecimiento que presenta la concentración de dióxido de carbono dentro del sistema, para este ensayo el valor de flujo de salida del balón de dióxido de carbono se redujo, por este motivo la concentración de dióxido de carbono mostró un incremento más controlado. Para este experimento en específico el valor de concentración deseado fue de un 20%, como se observa de la Figura 6.7, el sistema tarda aproximadamente 40 minutos para llegar a este valor meta, pero una vez que lo alcanza se mantiene siempre en un valor aceptable para el experimento. Es posible observar como mientras el sistema esté en funcionamiento el valor de concentración de dióxido de carbono no baja de un 19,4% lo cual indica que el sistema realiza la regulación de forma adecuada.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

1. El sensor de medición de concentración de dióxido de carbono K33-BLG es una plataforma versátil y precisa de medición para proyectos de investigación, debido a su tamaño compacto (5.7cm) y su corto tiempo de muestreo (30s).
2. LabVIEW es un sistema que en los últimos años se ha convertido en una de las mejores opciones a la hora de automatizar procesos, ya que permite diseñar sistemas que trabajen a la velocidad del computador, a diferencia de otros ambientes de desarrollo que están limitados a velocidades menores a la máxima del equipo.
3. La herramienta VISA de LabVIEW es una opción ideal cuando se tienen que desarrollar aplicaciones que requieran de comunicación serial, ya que esta permite una velocidad de hasta 115200 baudios por segundo, velocidad suficiente para poder controlar la mayoría de periféricos con comunicación de tipo serial.
4. La adquisición de los datos de concentración de dióxido de carbono resultó adecuadamente precisa, ya que el porcentaje de error para estas mediciones fue de un 3.15% valor de incertidumbre que se encuentra dentro del rango definido como aceptable.
5. Los porcentajes de error en los datos de temperatura (1.99%) y de humedad relativa (2.98%), son aceptables para la aplicación deseada y para los análisis que se desea llevar a cabo.
6. Se desarrolló un sistema que se encuentra en la capacidad de llevar la concentración dióxido de carbono a un valor definido y mantener este valor constante durante periodos de ejecución de mínimo dos semanas consecutivas.
7. Debido a la precisión de adquisición de datos y control de dióxido de carbono del sistema se concluye que éste está en la capacidad de desarrollar ensayos de carbonatación con resultados válidos.

7.2 Recomendaciones

- a. Para ediciones futuras del sistema se debe de considerar la posibilidad de adquirir un mayor número de sensores, esto para poder realizar mediciones en distintas secciones de la cámara y probar la homogeneidad de los elementos a lo interno.
- b. Se puede considerar la compra de más válvulas de expansión electrónica para poder tener un mayor control sobre el flujo de aire que lleva la humedad hacia dentro de la cámara.
- c. En un futuro desarrollo se debe de modificar el sistema para permitir el control de la temperatura interna, con el fin de llevar a cabo ensayos más controlados.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Del Valle, T. Perez y M. Madrid, «EL Fenomeno de la corrosion en estructuras de concreto reforzado,» Querétaro, 2001.
- [2] D. Linares y M. Sánchez, «Construction, operation and performance of a chamber for tests of accelerated carbonation,» *Revista técnica, Universidad del Zulia*, vol. 26, nº 1, pp. 34-44, 2003.
- [3] G. Cifuentes, C. Vargas, J. Simpson y C. Henríquez, «Ensayo de corrosión acelerada en cámara de niebla salina,» *Remetallica*, nº 11, 2004.
- [4] A. M. Carvajal, C. Silva, V. J y A. Venegas, «Efectos de la carbonatación acelerada en distintos tipos de cemento y hormigones,» *Revista de la construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile*, vol. 6, nº 1, pp. 88-97, 2007.
- [5] I. Ocampo, O. Vuanello, R. Ortúzar, H. Seminara, G. Paez, I. Ibarbe, S. Bustos y R. Vila, «Estudio de la carbonatación del hormigón armado en zonas revenidas, para prevenir riesgos de corrosión,» de *Congreso Iberoamericano y VIII Jornada "Técnicas de Restauración y Conservación del Patrimonio"*, La Plata, Buenos Aires, Argentina, 2009.
- [6] R. Lasrado, F. Melroy, M. Anil y V. Prinson, «Automation of Water Management System Using LabVIEW,» *Journal of Mechanical Engineering and Automation* , vol. 5, nº 3B, pp. 88-93, 2015.
- [7] K. Pradeep, K. Sai, C. Chandra y K. Nagabhushan, «Development of dual-axis solar tracking using arduino with LabVIEW,» *International Journal of Engineering Trends and Technology*, vol. 17, nº 7, pp. 321-324, 2014.
- [8] C. Pradeep y G. S, «Control of Stepper Motor Using Surface EMG Signals,» *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and*

Instrumentation Engineering, vol. 4, nº 10, 2015.

- [9] A. Hemza, H. Abdeslam, C. Rachid, M. Pasquinelli y D. Barakel, «Tracing current-voltage curve of a solar panel Based on LabVIEW Arduino Interfacing,» *BİLİŞİM TEKNOLOJİLERİ DERGİSİ*, vol. 8, nº 3, pp. 117-123, 2015.
- [10] J. Ávila y J. Genescá, «Más allá de la herrumbre II. La lucha contra la corrosión,» *Ciencia para todos*, [En línea]. Available: <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/masalla2.htm>. [Último acceso: 13 Mayo 2017].
- [11] NASA, «Corrosion Technology Laboratory,» NASA, [En línea]. Available: [https://corrosion.ksc.nasa.gov/electrochem_cells.htm#Electrochemical Reactions](https://corrosion.ksc.nasa.gov/electrochem_cells.htm#ElectrochemicalReactions). [Último acceso: 13 Mayo 2017].
- [12] R. Montani, «La carbonatación, enemigo olvidado del concreto,» *Revista Construcción y Tecnología*, 2000.
- [13] I. Galán, «Carbonatación del hormigón: combinación de CO₂ con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH, tesis doctoral,» Madrid, 2011.
- [14] E. Chávez, T. Pérez, J. Reyes, F. Corvo y J. Osorno, «Carbonatación de concreto en atmósfera natural y cámara de carbonatación acelerada,» *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, vol. 41, 2010.
- [15] M. Thiéry, P. Faure, A. Morandea, G. Platret, J. Bouteloup, P. Dangla y V. Baroghel, «Effect of Carbonation on the Microstructure and Moisture,» de *International Conference on Durability of Building Materials and components*, Porto, Portugal, 2011.
- [16] E. Moreno, «Determinación del pH de la solución de los poros de concreto después de un proceso acelerado de carbonatación,» *Revista Académica de la FI-UADY*, vol. 10, nº 3, pp. 5-12, 2006.

- [17] E. Moreno, L. Domínguez, G. Gerardo, C. Sarabia, J. Enrique y F. Duarte, «Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración,» *Revista de ingeniería, universidad autonoma de Yucatán*, vol. 8, n° 2, pp. 117-130, 2004.
- [18] J. M, R. Huang y Y. CC, «Effects of carbonation on mechanical properties and durability of concrete using acelerated testing method,» *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 10, n° 1, pp. 14-20, 2002.
- [19] K. Shankar Bhavani, «Physical Method of CO2 Measurement,» *Capnography*, 2013. [En línea]. Available: <http://www.capnography.com/new/physical-methods-of-co2-measurement>. [Último acceso: 14 Mayo 2017].
- [20] Academia online, «Absorción infrarroja (Proceso IR),» *Testo Argentina*, 2010. [En línea]. Available: <http://www.academiatesto.com.ar/cms/absorcion-infrarroja-proceso-ir>. [Último acceso: 14 Mayo 2017].
- [21] J. Perez, R. Murillo y R. Gómez, «Espectroscopías infrarroja y Raman,» UNAM, Ciudad de México.
- [22] N. Carrera, «Laboratorio tecnicas instrumentales,» *Universidad de Valladolid*, 2016. [En línea]. Available: <http://laboratoriotecnicasinstrumentales.es/analisis-quimicos/espectrometra-de-masas>. [Último acceso: 14 Mayo 2017].
- [23] R. Garcia Gómez, «Espectroscopia Fotoacústica: Una teoría antigua con nuevas aplicaciones,» *Conciencia Tecnológica*, n° 24, 2004.
- [24] T. Su Aye y Z. Myo Lwin, «Microcontroller Based Electric Expansion Valve Controller for Air Conditionign System,» *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 42, pp. 387-391, 2008.
- [25] O. Ortiz de Zevallos, «Válvulas de expansión,» 2009.

- [26] M. McComb, «Introduction to Stepper Motors,» Microchip, 2007. [En línea]. Available: http://www.microchip.com/stellent/groups/SiteComm_sg/documents/DeviceDoc/en543047.pdf. [Último acceso: 14 Mayo 2017].
- [27] T. Kissell, «Types of Stepper Motors,» National Instruments, 2000. [En línea]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/14891/en/#toc2>. [Último acceso: 14 Mayo 2017].
- [28] Universidad Nacional Abierta y a Distancia, «Pasos del Método Ingenieril,» [En línea]. Available: http://datateca.unad.edu.co/contenidos/90022/Modulo_2013_II/pasos_del_mtodo_ingenieril.html. [Último acceso: 14 Mayo 2017].
- [29] CO2 Meter, «K33-BLG/ELG Sensor Module For logging data sheet and Manual,» 31 Julio 2015. [En línea]. Available: <http://co2meters.com/Documentation/Datasheets/DS-K33ELG-BLG-PRODUCTDESCRIPTION.pdf>. [Último acceso: 14 Mayo 2017].
- [30] G. Matarrubia, «Puertos y Buses: I2C Y UART,» geekytheory, [En línea]. Available: <https://geekytheory.com/puertos-y-buses-1-i2c-y-uart>. [Último acceso: 15 Mayo 2017].
- [31] Adafruit, «FTDI Serial TTL-232 USB Cable,» Adafruit, [En línea]. Available: <https://www.adafruit.com/product/70>. [Último acceso: 15 Mayo 2017].
- [32] National Instruments, «Serial Communication Starting Point,» National Instruments, [En línea]. Available: <http://www.ni.com/tutorial/4049/en/>. [Último acceso: 16 Mayo 2017].
- [33] National Instruments, «National Instruments VISA,» National Instruments, [En línea]. Available: <https://www.ni.com/visa/>. [Último acceso: 16 Mayo 2017].
- [34] National Instruments, «Plotting Data on 2D Graphs,» National Instruments, Junio 2013. [En línea]. Available: http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361K-01/lvhowto/plotting_2d_graphs/. [Último acceso: 16 Mayo 2017].

- [35] National Instruments, «Moving Data From LabVIEW Into Excel,» National Instruments, 7 Abril 2011. [En línea]. Available: <http://www.ni.com/newsletter/51339/en/>. [Último acceso: 16 Mayo 2017].
- [36] CO2 meter, «K-33 BLG 30% CO2/Temp/RH Data Logging Sensor,» CO2 meter, [En línea]. Available: <https://www.co2meter.com/collections/co2-sensors/products/k33-blg-co2-temperature-humidity-sensor>. [Último acceso: 16 Mayo 2017].
- [37] A. Robinson, «K-33 Host-Initiated Data Logging,» 29 Enero 2010. [En línea]. Available: <https://www.co2meter.com/collections/co2-sensors/products/k33-blg-co2-temperature-humidity-sensor>. [Último acceso: 16 Mayo 2017].
- [38] Fujikoki Corporation, «CAM electronic linear control valves,» Fujikoki Corporation, 2003. [En línea]. Available: http://www.fujikoki.co.jp/en/product/ro/pr_ro_linear.html. [Último acceso: 16 Mayo 2017].
- [39] J. Babcock, «Driving a unipolar step motor,» 2006. [En línea]. Available: <http://www.jasonbabcock.com/computing/breadboard/unipolar/index.html>. [Último acceso: 16 Mayo 2017].
- [40] S. Laxman Patil, «Why a driver is required to drive stepper motors?,» Quora, [En línea]. Available: <https://www.quora.com/Why-a-driver-is-required-to-drive-stepper-motors>. [Último acceso: 17 Mayo 2017].
- [41] Adafruit, «Adafruit Motor Shield V2 for Arduino,» 12 Enero 2017. [En línea]. Available: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-motor-shield-v2-for-arduino.pdf>. [Último acceso: 16 Mayo 2017].
- [42] National Instruments, «Tutorial: SubVIs,» National Instruments, 01 Abril 2015. [En línea]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/7593/en/>. [Último acceso: 17 Mayo 2017].

APÉNDICES

A.1 Glosario, abreviaturas y simbología

Acero inoxidable 304: Tipo de acero inoxidable, el 304 hace referencia a sus características físicas, principalmente a dureza, es usado como refuerzo de concreto ya que tiene una alta resistencia a la corrosión

ASTM: Organización de normas internacionales que desarrolla y publica acuerdos voluntarios de normas técnicas para distintos campos entre ellos: productos, servicios y distintos materiales que cumplen estas normas.

Carbonatación: Proceso mediante el cual el dióxido de carbono penetra la capa porosa del concreto, llegando hasta su refuerzo y finalmente causando corrosión.

Concreto reforzado: Tipo de material de construcción a base de cemento y con un refuerzo interno de acero.

Driver: Dispositivo encargado de dar la tensión suficiente para asegurar el adecuado funcionamiento de distintos tipos de motores eléctricos.

Estator: Parte fija de los motores eléctricos.

Fenolftaleína: Formula usada ampliamente en el campo de la ciencia como un indicador de pH, este cambia de color si está en un medio base y es incoloro si está en un medio ácido.

FTDI: Tipo de cable para comunicación serial, que permite la programación y control de distintos periféricos que necesiten un valor lógico de 3.3V o 5V.

I2C: Protocolo de comunicación serial disponible en muchos dispositivos electrónicos

K-33 BLG: Modelo de sensor de concentración de dióxido de carbono con un rango de 0 a 30%.

LabVIEW: Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench.

NI: National Instruments.

Puente-H: Circuito electrónico que permite a un motor DC girar en ambos sentidos.

Rotor: Parte móvil de un motor DC.

RS232: Recommended Standard 232.

Señales EMG: Señales de electrocardiograma.

Sensor NDIR: Sensor infrarrojo no dispersivo.

UART: Universal Asynchronous Receiver-Transmitter.

VI: Virtual instrument.

VISA: Virtual Instrument Software Architecture.

ANEXOS

B.1 Datos de mediciones de diferentes ensayos

Tabla B.1.1 Datos de medición de ensayo de 28 horas.

<i>Tiempo</i>	<i>CO2 (%)</i>	<i>Humedad relativa (%)</i>	<i>Temperatura(°C)</i>
9:14:33	0.01	52.81	24.97
10:11:47	0.01	64.89	24.89
11:09:01	0.01	67.88	25.26
12:06:15	0.01	71.16	25.32
13:03:30	0.01	73.41	25.19
14:00:44	0.01	74.88	25.1
14:57:58	0.01	75.72	25.03
15:55:12	0.01	76.25	25.01
16:52:27	0.01	76.71	24.97
17:49:41	0.01	77	24.95
18:46:55	0.01	77.3	24.9
19:44:09	0.01	77.46	24.86
20:41:24	0.01	77.65	24.83
21:38:38	0.01	77.76	24.8
22:35:52	0.01	77.89	24.74
23:33:07	0.01	77.97	24.71
0:30:21	0.01	78.05	24.69
1:27:35	0.01	78.19	24.61
2:24:50	0.01	78.21	24.6
3:22:04	0.01	78.35	24.54
4:19:19	0.01	78.37	24.51
6:09:03	0.01	78.53	24.42
7:06:18	0.01	78.62	24.34
8:03:32	0.01	78.7	24.28
9:00:46	0.01	78.67	24.27
9:58:01	0.01	78.67	24.25
10:55:16	0.01	78.48	24.28
11:52:30	0.01	78.21	24.46
12:49:45	0.01	78.21	24.43
13:46:59	0.01	78.13	24.44
13:52:12	0.01	78.16	24.41
13:57:24	0.01	78.16	24.43

Tabla B.1.2 Mediciones de porcentaje de error para cada variable medida por el sistema

Hora	CO2			Temperatura			Humedad relativa		
	GasLab	LabVIEW	%Error	GasLab	LabVIEW	%Error	GasLab	LabVIEW	%Error
12:34:46	0.174	0.169	2.87	24.96	25.38	1.68	73.19	71.36	2.50
12:40:40	0.178	0.175	1.69	24.92	25.43	2.05	73.25	71.21	2.78
12:46:35	0.179	0.174	2.79	24.97	25.5	2.12	73.25	71.09	2.95
12:49:48	0.179	0.176	1.68	24.96	25.47	2.04	73.25	71.06	2.99
12:53:01	0.179	0.172	3.91	24.97	25.46	1.96	73.27	71.09	2.98
12:56:47	0.172	0.176	2.33	24.96	25.47	2.04	73.27	71.09	2.98
13:03:45	0.175	0.176	0.57	24.99	25.48	1.96	73.27	71.03	3.06
13:07:31	0.181	0.173	4.42	25.00	25.48	1.92	73.22	71.03	2.99
13:11:17	0.173	0.178	2.89	25.00	25.51	2.04	73.25	71.03	3.03
13:16:03	0.182	0.174	4.40	25.01	25.51	2.00	73.19	71	2.99
13:16:35	0.177	0.171	3.39	25.02	25.54	2.08	73.22	70.97	3.07
13:17:07	0.181	0.175	3.31	25.02	25.45	1.72	73.22	70.97	3.07
13:17:40	0.181	0.172	4.97	25.02	25.56	2.16	73.22	70.94	3.11
13:18:12	0.179	0.174	2.79	25.03	25.55	2.08	73.22	70.94	3.11
13:18:44	0.177	0.172	2.82	25.03	25.56	2.12	73.22	70.91	3.15
13:19:16	0.185	0.174	5.95	25.03	25.54	2.04	73.22	70.91	3.15
13:19:48	0.181	0.174	3.87	25.03	25.53	2.00	73.19	70.91	3.12
13:20:21	0.175	0.176	0.57	25.04	25.54	2.00	73.22	70.94	3.11
13:20:53	0.175	0.172	1.71	25.04	25.53	1.96	73.16	70.94	3.03
13:21:25	0.180	0.172	4.44	25.04	25.55	2.04	73.19	70.94	3.07
13:21:57	0.171	0.178	4.09	25.03	25.54	2.04	73.16	70.97	2.99
13:22:30	0.179	0.171	4.47	25.04	25.52	1.92	73.19	70.94	3.07
13:23:02	0.178	0.174	2.25	25.06	25.54	1.92	73.19	70.94	3.07
13:23:34	0.181	0.171	5.52	25.05	25.56	2.04	73.16	70.94	3.03
13:24:06	0.175	0.177	1.14	25.04	25.55	2.04	73.16	70.91	3.08
13:24:39	0.175	0.172	1.71	25.04	25.57	2.12	73.16	70.88	3.12
13:25:11	0.186	0.171	8.06	25.04	25.58	2.16	73.13	70.85	3.12
13:25:43	0.177	0.172	2.82	25.05	25.58	2.12	73.10	70.85	3.08
13:26:15	0.171	0.179	4.68	25.06	25.56	2.00	73.16	70.88	3.12
13:26:47	0.181	0.173	4.42	25.04	25.58	2.16	73.13	70.85	3.12
13:27:20	0.180	0.174	3.33	25.06	25.57	2.04	73.10	70.88	3.04
13:27:52	0.177	0.175	1.13	25.08	25.55	1.87	73.12	70.88	3.06
13:28:24	0.180	0.171	5.00	25.05	25.56	2.04	73.10	70.91	3.00
13:28:56	0.186	0.174	6.45	25.06	25.56	2.00	73.13	70.88	3.08

Continuación Tabla B.1.2

13:29:29	0.180	0.172	4.44	25.06	25.57	2.04	73.13	70.88	3.08
13:30:01	0.174	0.177	1.72	25.06	25.56	2.00	73.13	70.85	3.12
13:30:33	0.174	0.179	2.87	25.07	25.58	2.03	73.12	70.85	3.10
13:31:05	0.178	0.175	1.69	25.04	25.58	2.16	73.10	70.85	3.08
13:31:37	0.179	0.173	3.35	25.06	25.58	2.08	73.10	70.82	3.12
13:32:10	0.181	0.174	3.87	25.06	25.59	2.11	73.11	70.82	3.13
13:32:42	0.173	0.177	2.31	25.07	25.58	2.03	73.10	70.85	3.08
13:33:14	0.181	0.174	3.87	25.09	25.6	2.03	73.13	70.82	3.16
13:33:46	0.178	0.172	3.37	25.07	25.59	2.07	73.10	70.82	3.12
13:34:18	0.179	0.173	3.35	25.09	25.6	2.03	73.10	70.85	3.08
13:34:51	0.184	0.172	6.52	25.08	25.58	1.99	73.10	70.85	3.08
13:35:23	0.179	0.173	3.35	25.08	25.57	1.95	73.10	70.85	3.08
13:35:55	0.181	0.178	1.66	25.10	25.59	1.95	73.10	70.85	3.08
13:36:27	0.175	0.173	1.14	25.10	25.6	1.99	73.00	70.85	2.95
13:36:59	0.182	0.172	5.49	25.07	25.59	2.07	73.10	70.82	3.12
13:37:32	0.173	0.178	2.89	25.08	25.6	2.07	73.07	70.82	3.08
13:38:04	0.180	0.179	0.56	25.10	25.62	2.07	73.08	70.79	3.13
13:38:36	0.180	0.174	3.33	25.09	25.61	2.07	73.08	70.79	3.13
13:39:08	0.181	0.172	4.97	25.09	25.62	2.11	73.08	70.82	3.09

Tabla B.1.3 Mediciones de dióxido de carbono durante ensayo con concentración definida

<i>Hora</i>	<i>Concentración de dióxido de carbono</i>
9:46:51	0.10
9:53:29	0.13
9:58:28	0.10
10:03:26	0.10
10:08:24	0.10
10:13:22	0.12
10:18:20	0.10
10:23:18	0.13
10:28:16	0.12
10:33:14	0.12
10:38:13	0.11
10:43:11	0.93
10:48:09	0.17
10:53:08	0.16
10:58:06	0.17
11:03:05	0.18
11:08:03	3.49
11:13:02	6.13
11:18:01	11.95
11:20:30	11.92
11:22:34	11.94
11:24:39	11.54
11:27:33	11.43
11:27:58	11.42
11:28:23	11.43
11:28:47	11.39
11:29:12	11.42
11:29:37	11.42
11:31:42	11.36
11:32:07	11.36
11:32:31	11.35
11:32:56	11.37
11:33:21	11.38
11:35:01	11.32
11:35:26	11.33

Continuación Tabla B.1.3

11:35:51	11.25
11:36:16	11.25
11:36:40	11.22
11:38:20	11.10
11:38:45	11.06
11:39:10	11.05
11:39:35	11.20
11:41:14	11.15
11:41:39	11.11
11:42:04	11.13
11:42:29	11.14
11:42:54	11.15
11:44:33	11.13
11:44:58	11.14
11:45:23	11.06
11:45:48	11.09
11:46:13	11.12
11:46:38	11.11
11:48:42	11.08
11:49:07	11.07
11:49:32	11.09
11:49:57	11.08
11:50:22	11.03
11:54:56	11.00
11:55:21	10.98
11:55:46	11.06
11:56:11	11.04
11:56:36	11.03
11:57:01	11.03
11:57:26	11.01
11:57:51	11.02

Tabla B.1.4 Mediciones de dióxido de carbono durante ensayo de carbonatación

<i>Hora</i>	<i>Concentración de dióxido de carbono (%)</i>
9:39:59	8.45
9:40:33	8.33
9:41:07	7.22
9:41:42	8.86
9:42:16	10.55
9:42:50	12.06
9:43:24	12.81
9:45:06	14.31
9:55:24	17.1
10:00:31	17.67
10:04:49	18.11
10:10:02	18.71
10:13:27	19.29
10:20:16	19.65
10:23:04	19.46
10:25:20	19.56
10:29:28	19.52
10:33:47	19.61
10:38:06	19.52
10:42:25	19.46
10:47:35	19.53
10:52:18	19.45
10:55:37	19.56
11:00:11	19.53
11:05:09	19.52
11:10:08	19.42
11:15:31	19.49
11:20:05	19.57
11:25:04	19.49
11:30:02	19.47

B.2 Fotografía de la cámara de carbonatación



Figura B.2.1 Fotografía de la cámara de carbonatación.