



FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE UNA CÁMARA DE  
ATMÓSFERA CONTROLADA PARA ENSAYOS DE  
LABORATORIO DE CONSERVACIÓN DE ALIMENTOS CON  
CAPACIDAD DE SENSADO DE TEMPERATURA, OXÍGENO  
Y DIÓXIDO DE CARBONO (CO<sub>2</sub>) Y CONTROL PID DE NIVEL  
DE NITRÓGENO (N<sub>2</sub>) MEDIANTE MÉTODO ROOT LOCUS**

**PRESENTADA POR  
DIANA ÑAUPA CONGACHI  
ERNESTO JESÚS SANCHEZ PEDRAZA**

**ASESOR**

**FERNANDO MAURICIO JIMENEZ MOTTE**

**TESIS  
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRÓNICO**

**LIMA – PERÚ  
2022**



**CC BY-NC-SA**

**Reconocimiento – No comercial – Compartir igual**

El autor permite transformar (traducir, adaptar o compilar) a partir de esta obra con fines no comerciales, siempre y cuando se reconozca la autoría y las nuevas creaciones estén bajo una licencia con los mismos términos.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



**USMP**

UNIVERSIDAD DE  
SAN MARTÍN DE PORRES

Facultad de  
Ingeniería y  
Arquitectura

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE UNA CÁMARA DE  
ATMÓSFERA CONTROLADA PARA ENSAYOS DE  
LABORATORIO DE CONSERVACIÓN DE ALIMENTOS CON  
CAPACIDAD DE SENSADO DE TEMPERATURA, OXÍGENO Y  
DIÓXIDO DE CARBONO (CO<sub>2</sub>) Y CONTROL PID DE NIVEL DE  
NITRÓGENO (N<sub>2</sub>) MEDIANTE MÉTODO ROOT LOCUS**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO  
ELECTRÓNICO**

**PRESENTADA POR**

**DIANA, ÑAUPA CONGACHI**

**ERNESTO JESÚS, SANCHEZ PEDRAZA**

**ASESOR**

**Ph. D(c), MSEE, BSEE FERNANDO JIMENEZ MOTTE**

**LIMA – PERÚ**

**2022**

Dedicamos este proyecto a nuestros padres, que han sido los pilares fundamentales durante todo este tiempo, nos han impulsado y aconsejado en los momentos en que hemos necesitado de un rumbo o una guía en la vida personal y profesional.

Una mención muy especial a nuestro asesor, el Ing. Fernando Jiménez Motte, por su valioso tiempo y su gran dedicación a la enseñanza y a la investigación con pasión

Los autores

Agradecemos a Dios por darnos salud y bienestar, por permitirnos lograr uno de nuestros sueños y por concedernos una maravillosa familia.

A nuestros padres por habernos dado el mejor regalo, la educación; por todo el tiempo que nos dedican siempre; y, por su ayuda, preocupación y entrega que eternamente agradeceremos.

A todos los compañeros que tuvimos el agrado de conocer durante nuestra formación académica y que se convirtieron en grandes amigos.

Un agradecimiento especial a nuestro asesor, el Ing. Fernando Jiménez Motte, por enseñarnos a investigar con pasión y aconsejarnos la capacitación permanente.

Los autores

## ÍNDICE

	Pág.
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCCIÓN	xvi
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	
1.1. Situación problemática	1
1.2. Definición del problema	6
1.3. Formulación del problema	7
1.4. Objetivos	8
1.5. Importancia de la investigación	9
1.6. Viabilidad de la investigación o presupuesto	10
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	
2.1. Antecedentes de la investigación	15
2.2 Bases teóricas	41
2.3 Modelamiento	55
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	
3.1 Materiales	88
3.2 Funcionamiento	95

	Pág.
CAPÍTULO IV. MODELAMIENTO	
4.1. Modelamiento matemático del prototipo de cámara de atmósfera controlada	98
4.2 Modelamiento de los sensores	107
CAPÍTULO V. PRUEBAS Y RESULTADOS	
5.1 Sensor de CO <sub>2</sub> MH-Z19C	119
5.2 Sensor de temperatura DS18B20	122
5.3 Sensor de calidad del aire MQ-135	125
5.4 Sensor de concentración de oxígeno ME2-O2	129
5.5 Diseño de algoritmo con control PID	133
5.6 Simulación del proceso de control	136
CONCLUSIONES	140
RECOMENDACIONES	142
REFERENCIAS	143
ANEXOS	148

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Pág.
Figura 1 Se muestra el Laboratorio del INIA. ....	3
Figura 2 Esquema de una cámara de atmósfera controlada .....	6
Figura 3 Intercambiador de calor. ....	7
Figura 4 Unidad de humedad.....	16
Figura 5 Diagrama de bloques del proceso de enfriamiento y deshumidificación.....	17
Figura 6 Valores promedio en Opuntia ficus indica mínimamente procesada. ....	20
Figura 7 Cambios en color y sólidos solubles totales (SST) .....	22
Figura 8 Diagrama general del prototipo.....	24
Figura 9 Esquema de la cámara de atmósfera controlada.....	25
Figura 10 Esquema de una cámara de atmosfera controlada. ....	30
Figura 11 Esquema de un sistema de refrigeración indirecta. ....	31
Figura 12 Esquema de un sistema de refrigeración directa.....	31
Figura 13 Diseño CAD de la cámara de temperatura controlada.....	32
Figura 14 Cámaras con atmósfera controlada. ....	33
Figura 15 Planta de temperatura.....	38

	Pág.
Figura 16 Incubación de los frutos y extracción de muestras .....	39
Figura 17 Cajas utilizadas para el almacenamiento de las naranjas con celdas, Córdoba - España.....	40
Figura 18 Esquema de una cámara de atmósfera controlada. ....	48
Figura 19 Termómetro de gas a presión constante .....	53
Figura 20 Diagrama de bloques.....	56
Figura 21 Tipo de entradas para sistema de control.....	56
Figura 22 Curva de respuesta exponencial.....	57
Figura 23 Respuesta a rampa unitaria del sistema mostrado en la Figura 20(a).....	59
Figura 24 “Respuesta a impulso unitario del sistema mostrado en la Figura 20(a)”. ....	60
Figura 25 Sistema de dos polos.....	62
Figura 26 Sistema de segundo orden .....	63
Figura 27 Curvas de respuesta a escalón unitario del sistema mostrado en la Figura 26. ....	68
Figura 28 Respuesta típica de un sistema de control a una entrada escalón unitario.....	69
Figura 29 Par de curvas envolventes para la curva de respuesta escalón unitario del sistema que aparece en la Figura 26.....	71
Figura 30 Curvas de tiempo de asentamiento $t_s$ contra $\zeta$ .....	73
Figura 31 Curva de $m_p$ contra $\zeta$ .....	74
Figura 32 Definición del ángulo $\beta$ .....	75
Figura 33 Diagrama de bloques del sistema de control. ....	77
Figura 34 Diagrama de bloques de un controlador ON-OFF. ....	78
Figura 35 Diagrama de bloques de un controlador PID. ....	81
Figura 36 Sistema de control. ....	82

	Pág.
Figura 37 Construcción del lugar de las raíces. [Ángulo de salida= $180^\circ - \theta_1 + \theta_2 + \varphi$ ].	86
Figura 38 El almacén, aislamiento y la cámara de limpieza.	89
Figura 39 Compresor Marca TECUMSEH BRASIL Modelo: AE4440YS.	90
Figura 40 Filtro secador	91
Figura 41 Diagrama de bloques del proceso.	95
Figura 42 Partes de un sistema de refrigeración.	96
Figura 43 Distribución de recinto de atmósfera controlada.	97
Figura 44 Diagrama de bloques de los componentes del prototipo.	99
Figura 45 Planta del sistema de control.	100
Figura 46 Desviación del sistema del estado de equilibrio.	101
Figura 47 Diagrama de bloques del sistema de control.	102
Figura 48 Diagrama de bloques del flujo de entrada. Donde $N_i$ corresponde al flujo de entrada.	104
Figura 49 Diagrama de bloques del flujo de salida. Donde $N_s$ corresponde al flujo de salida.	104
Figura 50 Diagrama de bloques de la planta	106
Figura 51 Diagrama de bloques del sistema de control de lazo cerrado.	107
Figura 52 Diagrama de bloques del sensor de oxígeno.	108
Figura 53 Diagrama de bloques del sensor de CO <sub>2</sub>	108
Figura 54 Diagrama de bloques del sensor de temperatura	109
Figura 55 Diagrama de bloques del sensor de HR	109
Figura 56 Diagrama de bloques del sensor de nitrógeno.	110
Figura 57 Lazo abierto del sistema de control	111
Figura 58 Lugar de las raíces	113
Figura 59 Lugar de las raíces (a)	115

	Pág.
Figura 60 Lugar de las raíces (b).....	115
Figura 61 Diagrama de bloques del controlador PID .....	116
Figura 62 Diagrama de bloques del lazo cerrado .....	117
Figura 63 Respuesta al escalón unitario.....	117
Figura 64 Sensor MH-Z19C.....	120
Figura 65 Pines del sensor MH-Z19C.....	120
Figura 66 Conexión entre arduino y sensor de CO2.....	121
Figura 67 Mediciones del sensor MH-Z19C.....	121
Figura 68 Sensor MH-Z19C conectado a Arduino. ....	122
Figura 69 Conexión entre RPI y sensor de temperatura .....	123
Figura 70 Conexión entre RPI y sensor. ....	124
Figura 71 Mediciones del sensor. ....	124
Figura 72 Conexión entre arduino y sensor MQ135 .....	126
Figura 73 Mediciones del sensor MQ135.....	127
Figura 74 Dispositivos dispuestos para prueba de calibración. ....	127
Figura 75 Medición de calidad del aire en recipiente con alcohol. ....	128
Figura 76 Relación entre concentración de alcohol y relación $R_s/R_o$ . ....	129
Figura 77 Relación entre corriente y Concentración .....	129
Figura 78 Circuito de acondicionamiento.....	130
Figura 79 Mediciones del sensor ME2-O2.....	131
Figura 80 Dispositivos dispuestos para prueba de calibración. ....	132
Figura 81 Medición de concentración de oxígeno en recipiente lleno de CO2. ....	132
Figura 82 Sensado de oxígeno en recipiente lleno de alcohol.....	132
Figura 83 Algoritmo de control de la inyección de N2.....	135
Figura 84 Respuesta a la entrada impulso.....	136

	Pág.
Figura 85 Respuesta al escalón unitario.....	137
Figura 86 Respuesta a la rampa unitaria. ....	138
Figura 87 Esquema del circuito de la etapa de control. ....	139

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Matriz FODA del rocoto.....	5
Tabla 2 Costos de gabinete. ....	11
Tabla 3 Costo sistema de refrigeración Soles (S/). ....	12
Tabla 4 Sistema de Inyección de Nitrógeno y extracción de Dióxido de Oxígeno.....	12
Tabla 5 Costo Total del Recinto de Atmósfera Controlada. ....	13
Tabla 6 Condiciones de almacenamiento en atmósferas controladas de algunos productos. ....	18
Tabla 7 Intensidad de transmisión de O <sub>2</sub> y vapor de agua de materiales. ....	21
Tabla 8 Tratamientos utilizados en el experimento.....	23
Tabla 9 Clasificación de los cultivos hortícolas. ....	26
Tabla 10 Efecto de diferentes concentraciones de O <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> (AC) sobre la calidad post-cosecha y tiempo de vida útil de frutos. ....	29
Tabla 11 Tabla de conversión de temperaturas.....	52
Tabla 12 Descripción de las variables del proceso .....	101
Tabla 13 Parámetros del proceso .....	106
Tabla 14 Distintos puntos en el lugar de las raíces .....	113

	Pág.
Tabla 15 Resumen de parámetros del proceso .....	117
Tabla 16 Valores del sensor de temperatura .....	125
Tabla 17 Valores del sensor de calidad de aire .....	128
Tabla 18 Valores del sensor de oxígeno.....	133
Tabla 19 Electroválvulas de control 2/2 NC: modelo (cat. No.) SC8296A006-3. Marca ASCO.....	180
Tabla 20 Válvula check: modelo (cat. No) V012 005 – 3, marca ASCO. ....	180
Tabla 21 Sensor galvánico de oxígeno disuelto: modelo ME2.....	180
Tabla 22 Sensor de dióxido de carbono gaseoso: Modulo para dióxido de carbono modelo MQ 135.....	181
Tabla 23 Sensor de humedad y temperatura_ modelo DS18B20 .....	182
Tabla 24 Resistencia tipo cartucho: a medida .....	182
Tabla 25 Tanques de suministro de gases y válvula reguladora INFRA.....	183
Tabla 26 Ventilador: modelo VN6A, marca STEREN .....	183
Tabla 27 Microcontrolador: modelo PIC18F452, MICROCHIP .....	184
Tabla 28 LEDs indicadores rojo y verde. 3 mm. ....	184
Tabla 29 Amplificador operacional CMOS_ Modelo OPA333 .....	185
Tabla 30 Amplificadores operacionales (circuito integrado de 4 OA): modelo LM6132. ....	185
Tabla 31 Relevador I/O (PVR): modelo ODC4/15-L, marca Panasonic.....	186
Tabla 32 Convertidor digital – analógico (DAC): modelo MAX5839, marca MAXIM .....	186
Tabla 33 Relevador estado sólido (SSR): modelo G3NE-205T-US-DC5, marca OMRON .....	187
Tabla 34 Revelador de estado solido (SSR): modelo AQ1AD2-3/28VDC, marca PANASONIC .....	188

## RESUMEN

Esta tesis tiene como objetivo diseñar un prototipo eficiente para laboratorios de conservación de alimentos, orientado a facilitar la programación y configuración de parámetros físicos (Temperatura, Oxígeno y Dióxido de Carbono) y control PID del nivel de Nitrógeno para una cámara de atmósfera controlada de grandes dimensiones mediante método Root Locus. El diseño metodológico fue realizado en base a los objetivos planteados para la implementación, y a través del diagrama de bloques, el diseño estructural, el funcionamiento de la cámara y la evaluación e implementación de sensores.

Después de seis meses de investigación, se logró diseñar el prototipo de una cámara de atmósfera controlada que permite el estudio de conservación de alimentos con capacidad de sensado de temperatura, medición de oxígeno y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y control PID del nivel de nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), de acuerdo con los requerimientos del servicio y tal como se planteó en los objetivos. Una vez culminado el método ingenieril, se logró también: 1) realizar el diseño físico de la cámara de atmósfera controlada, 2) seleccionar los componentes y los circuitos de interfaz apropiados para estos, 3) diseñar y programar el aplicativo de control y el interfaz de control para el usuario. En la etapa final se comprobó que, a nivel de prototipo, el sistema funciona adecuadamente.

**Palabras clave:** cámara, atmósfera controlada, Root Locus, conservación de alimentos, prototipo

## **ABSTRACT**

The thesis has the objective to design an efficient prototype for food conservation laboratories, which can facilitate the programming and configuration of physical parameters (Temperature, Oxygen and Carbon Dioxide) and PID control of the Nitrogen level for a controlled atmosphere camera of large dimensions using the Root Locus method. The methodological design was carried out based on the objectives set for the implementation, and through a block diagram, the structural design, the operation of the camera and the evaluation and implementation of sensors.

After six months of research, it was possible to design the prototype of a controlled atmosphere camera that allows the study of food preservation with temperature sensing capacity, measurement of oxygen and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and PID control of the level of nitrogen (N<sub>2</sub>), in accordance with the requirements of the service and as proposed in the objectives. Once the engineering method was completed, it was also achieved: 1) perform the physical design of the controlled atmosphere camera, 2) select the appropriate components and interface circuits for them, 3) design and program the control application and the control interface for the user. In the final stage, it was found that, at the prototype level, the system works properly.

**Keywords:** camera, Controlled atmosphere, Root Locus, food preservation, prototype.

## Reporte de similitud

Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

**DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE UNA CÁMARA DE ATMÓSFERA CONTROLADA PARA ENSAYOS DE LABORATORIO DE CONSERVA**

AUTOR

**DIANA ÑAUPA CONGACHI / ERNESTO JESÚS SANCHEZ PEDRAZA**

RECuento DE PALABRAS

**29928 Words**

RECuento DE CARACTERES

**153567 Characters**

RECuento DE PÁGINAS

**206 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**7.3MB**

FECHA DE ENTREGA

**Apr 5, 2023 8:27 AM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Apr 5, 2023 8:29 AM GMT-5**

### ● 9% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base

- 7% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 4% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Cross

### ● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)



Resumen

## INTRODUCCIÓN

En el Perú, uno de los principales factores para el avance de la investigación científica es la falta de apoyo de materiales y equipamiento para realizar los estudios y pruebas necesarias que se requieren en diferentes campos y uno de ellos es el campo de la ingeniería agrícola.

En los últimos 20 años la producción y exportación de productos agrícolas ha aumentado de manera considerable, por lo que se tienen que realizar estudios a cada fruto, y para ello se tiene que implementar las herramientas necesarias que ayuden a facilitar el trabajo, y permita conocer las propiedades de cada fruto.

La presente investigación tuvo como objetivo general desarrollar un prototipo eficiente para laboratorios de conservación de alimentos, orientado a facilitar la programación y configuración de parámetros físicos (Temperatura y Oxígeno) para una cámara de atmósfera controlada de grandes dimensiones. Para ello se tuvo que diseñar el prototipo de acuerdo a las dimensiones proporcionadas.

Es importante indicar que el presente trabajo presenta soluciones a la problemática planteada, el diseño del prototipo beneficia a los usuarios en lo siguiente: dar a conocer los aportes que realiza el laboratorio de análisis proteico en la agricultura; implementación del laboratorio de análisis proteico con un nuevo equipo de investigación, recinto de atmósfera controlada; el

cual facilita la investigación de conservación de Capsicum, para reducir las alteraciones y podredumbres a causa de los microorganismos, conservándolos de un ambiente de temperatura y humedad requerida (cada fruto se almacena a diferentes temperaturas); beneficia la prolongación del período óptimo de la conservación, respecto en atmósferas normales: el prototipo de menor capacidad, tiene menor costo de inversión en el desarrollo de la investigación; favorece al transporte de la exportación de Capsicum; disminuye el uso de aditivos químicos para la conservación; implementación del recinto con gases naturales que no afecten la capa de ozono.

Asimismo, los objetivos específicos de desarrollo de esta tesis se cumplieron y fueron los siguientes: diseñar el prototipo de cámara de refrigeración, desarrollar un dispositivo electrónico para monitorear la temperatura, oxígeno y dióxido de carbono del prototipo de cámara de refrigeración, diseñar un prototipo de cámara de limpieza, donde se pueda inyectar nitrógeno con el objetivo de disminuir el dióxido de carbono del prototipo de cámara de atmósfera controlada, diseñar un prototipo de cámara de atmósfera controlada que permita incorporar sensores digitales de alta sensibilidad de: temperatura, oxígeno y dióxido de carbono y validar el protocolo de pruebas a partir de diferentes instrumentos que nos indicaron los valores obtenidos.

Finalizada esta investigación se comprobó que con la implementación del prototipo de atmósfera controlada se pudo verificar cuánto dura el proceso de maduración de cada fruto o especie, para ello se determinó que es necesario saber previamente (mediante cálculos) los rangos a introducir, asimismo, se determinó que es imprescindible el monitoreo de las variables de temperatura y oxígeno. Con el diseño del prototipo también se logró determinar las características principales que ha conservado o que ha perdido el fruto, y específicamente con la implementación de los sensores de alta sensibilidad dentro de la cámara, se obtuvieron valores llegando a un 94% de exactitud, lo que facilitó el trabajo y permitió optimizar los resultados, lo que influyó favorablemente en el proceso de investigación.

La estructura de la tesis presenta 5 capítulos. En el Capítulo I se detalla la situación problemática, se define la pregunta de investigación, se plantean los objetivos, la importancia y viabilidad de la investigación. En el Capítulo II en el marco teórico se analizó los antecedentes relacionados con las variables de la investigación, tanto nacionales como internacionales, se definen las teorías y se desarrolla el modelo matemático. En el capítulo III se analiza la metodología, en donde se detallan los materiales y se describe el funcionamiento de los sistemas, sensores, y otros. En el capítulo IV se presenta el Modelamiento, se desarrolla el modelamiento matemático del prototipo, los sensores y los resultados de las mediciones en cada caso. En el capítulo V se presenta las pruebas y resultados, se realizaron las pruebas de calibración de los sensores comparando y analizando los resultados obtenidos, se diseñó el algoritmo con control PID el cual nos permitió controlar la variable a utilizar que fue el nitrógeno, teniendo todos estos resultados se realizó el proceso de simulación del proceso de control obteniendo los resultados esperados en el modelamiento matemático. Finalmente, se brindan las conclusiones, recomendaciones y las referencias bibliográficas.

## **CAPÍTULO I**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### 1.1. Situación problemática

El INIA tiene a nivel nacional laboratorios de estaciones experimentales, el Prototipo de Atmósfera Controlada fue diseñado y entregado al Centro experimental (CE) La Molina en el Laboratorio de Investigación Nutricional y Funcional de los Recursos Genéticos, en dicho lugar se encargan de hacer evaluaciones de los productos agrícolas desde sus inicios (semilla). Este lugar cuenta con 10 colaboradores que realizan investigación.

La función que tiene dicho Laboratorio es la de conservar alimentos genéticos como la quinua, kiwicha, cañihua, plantas medicinales, frutales (costa, sierra y selva) y todas las especies comestibles que se utilizan en la industria nativa y naturalizada.

Estas funciones no solo se realizan en Lima, sino también en diferentes partes del Perú, como ejemplo en Iquitos que se conserva uña de gato, cacao. En Chiclayo se conserva pallar, maní, algodón. En Arequipa está el Laboratorio que se encarga de la conservación del capsicum (Rocoto), ahí se evalúan materiales y encontrar o identificar opciones de aprovechamiento industrial, es decir buscan ciertas cualidades y

características que el mercado necesita. Ellos trabajan con toda esa diversidad y también trabajan con la variedad que genera la institución, es decir, esos materiales que se conservan después de todo un proceso de mejora genética al final se obtiene una variedad que tiene ciertos atributos y características bajo un acondicionador ecológico y después se les provee a los agricultores para que empiecen su cultivo. Todo este proceso mejora los cultivos del agricultor, que necesita producir una cantidad para el mercado, necesita un producto con cierta calidad y característica, quien se encarga de dicho mejoramiento genético son los laboratorios de investigación del INIA. Pero esa variedad se genera a partir de accesiones (tipos) o materiales que se conservan en el laboratorio. Por ejemplo se tiene como 2000 accesiones de quinua, pero de esas 2000 solo se han desarrollado 8 a 10 variedades ya que el proceso de mejora genética es un proceso que toma su tiempo entre 5 a 10 años y después se ve su comportamiento en campo si es estable o no es estable, actualmente se siguen analizando, porque es un proceso continuo, existen condiciones climatológicas, porque el entorno es variable, es ahí donde empieza la investigación para que se pueda suplir las necesidades y demandas del mercado. Se analizan esas variedades de quinua, pero aparte se tienen que investigar otros tipos de materiales que se conservan por ejemplo en Figura. 1, el laboratorio trata de abarcar todo, pero no cuenta con el personal necesario para realizar dichas investigaciones, la mayoría de los investigadores son tesistas y ellos trabajan por proyecto específico y luego se retiran.

## Figura 1

Se muestra el Laboratorio del INIA.



Fuente: INIA (2022)

Por cada recurso aparece una serie de oportunidades y por ello se tienen que realizar investigaciones, porque de esa forma se mueve el mundo.

En la actualidad no hay muchas investigaciones que se han realizado con el capsicum Pubescens (rocoto), es por eso que la exportación es deficiente.

Como en todo proceso de investigación primero se genera el conocimiento que es lo que más importa, y luego se hacen los estudios de los productos o materiales, ejemplo el capsicum Pubescens (rocoto) tiene cerca de 200 accesiones, pero de esas 200 cuales tienen las mejores cualidades y características para soportar 5°C por el tiempo de tres meses, finalmente verificar si tiene ciertas cualidades de sabor, de ponencia, de tamaño, se evalúa la textura, el PH, el antioxidante, todo eso abarca el proceso de investigación.

- El capsicum Pubescens (rocoto):
- Nombre del Producto: Rocoto Fresco
- Nombre científico: *Capsicum Pubescens*

El rocoto procede de los Andes y es uno de los ajíes cultivados en la época preincaica. Algunos expertos creen que se domesticó como planta de cultivo hace unos 5000 años.

El rocoto es el ají peruano más importante, que se utiliza fresca, en pasta, seca y/o molida. Es un fruto picante cuya pungencia puede controlarse arrancando las venas que contienen las semillas que constituyen la parte picante de la hortaliza. En el sur del país se come relleno de carne después de haberle quitado las venas.

#### Descripción Comercial del Producto:

- Aspecto: es redondo, de color rojo y se distingue de otros chiles por sus semillas negras.
- Textura: carne firme y fresca, sabor picante y dulce.

#### Datos técnicos:

- Zonas de producción: Las zonas de producción se ubican en la Ceja de Selva, donde termina la sierra y comienza la selva, en los Andes orientales peruanos, de los cuales Oxapampa-Pasco es un destacado centro de producción del mejor Rocoto. Otros departamentos productores de este vino son Huánuco y Junín.
- Periodos de producción: El rocoto procede de un clima cálido y lluvioso y se produce durante todo el año en Perú.

#### Usos:

- Comida: Por su sabor picante, se utiliza para hacer ensaladas, encurtidos, salsas picantes y guisos como el rocoto relleno, plato típico de Arequipa, ceviches, tiraditos y chaupi de queso.
  - Propiedades medicinales: tiene propiedades antigripales.
- Veneno: en algunas partes del país, las hojas machacadas se utilizan como veneno para flechas y cerbatanas.

Desde que se empieza a realizar el trabajo con la atmósfera hay que realizar investigaciones de conservación del producto, temperatura de cosecha, clima apropiado. Asimismo, capacitación al personal de cómo utilizar el recinto. En la Tabla. 1 se observa la Matriz FODA del Rocoto:

**Tabla 1**

*Matriz FODA del rocoto.*

Fortalezas	Oportunidades
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Propiedades útiles para el cuerpo humano.</li> <li>• Siembra durante todo el año.</li> <li>• Adaptable a varios tipos de climas entre zonas costeras y serranía.</li> <li>• Se puede ofertar en distintas presentaciones sin perder sus propiedades.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Crecimiento de la producción nacional.</li> <li>• El producto se siembra en varias regiones del país.</li> <li>• Gran demanda internacional.</li> </ul>
Debilidades	Amenazas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plagas y enfermedades muy dañinas.</li> <li>• Sensibles al transporte y manipuleo.</li> <li>• Sensibles al frío.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Crecimiento de la producción mundial (mayor competencia).</li> <li>• Sensible al frío extremo</li> </ul>

Fuente: INIA (2022)

El Laboratorio del INIA sede Lima, tiene como proyecto la adquisición de una cámara de atmósfera controlada de grandes dimensiones, que puede conservar de 50 a 100 Kg de productos, en la Figura. 2. Cámara de atmósfera controlada se aprecia un modelo, el cual tiene como finalidad la conservación de frutales en la fase de exportación, es decir en su período de su madurez fisiológica, esto se consigue con “la variación de las variables físicas que posee el ambiente como la temperatura, la humedad y el tipo de circulación del aire, también se consideran los niveles de oxígeno (O<sub>2</sub>) y la proporción de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)” (INIA, 2022). Se puede lograr calidad y frescura de frutos sin la

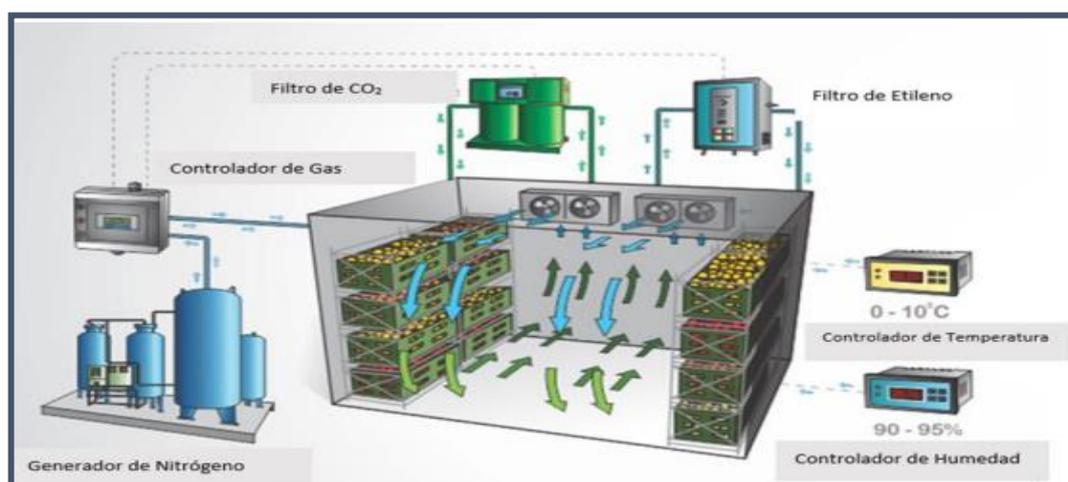
implementación de algún producto químico, esto ayuda con la disminución de pérdidas por podredumbres.

## 1.2. Definición del problema

Al visitar las instalaciones del Laboratorio del INIA se dialogó con los Ingenieros Jonell Soto Jerí y el Licenciado Fredy Quispe, quién hizo mención de la necesidad de tener un prototipo de este recinto de atmósfera controlada para realizar pruebas en las cuales se pueda evaluar y regular parámetros físicos: temperatura, oxígeno y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), para determinar con distintos tratamientos datos y/o cantidades precisas que conserven eficientemente los frutales de exportación. Esto se determina realizando análisis nutricionales, los cuales nos indicarán las variaciones de los grados brix. Se indicó de la importancia de realizar esta investigación debido a que en el recinto principal no se permiten realizar pruebas, solo se ingresan las cantidades precisas.

### Figura 2

*Esquema de una cámara de atmósfera controlada*



Fuente: Agroripe (2015)

Este proyecto de adquisición tiene como primera etapa la investigación de los parámetros adecuados, primero diseñando el prototipo inicial y luego la fabricación de más prototipos dependiendo de la variedad de productos los cuales se someterán a cuatro (04) diferentes tratamientos, dando como resultado en que tratamiento se conservó el frutal.

Este prototipo tiene que cumplir con los requerimientos y necesidades específicas del Laboratorio del INIA sede Lima de forma eficiente y concluyente brindando datos exactos para ser empleados en la cámara de grandes dimensiones.

Como se observa en la Figura. 3. Intercambiador de Calor, este es el modelo referente que el Lic. Fredy Quispe desea para el Recinto de Atmósfera Controlada para frutos y especies de exportación.

### **Figura 3**

*Intercambiador de Calor.*



Fuente: Quispe (2020)

### 1.3. Formulación del Problema

¿La falta de prototipos de cámara de atmósfera controlada en el país origina el tener que realizar pruebas en cámaras de

atmósfera controlada de mayor escala, poniendo en riesgo la pérdida de capsicum?

## 1.4. Objetivos

### 1.4.1. Objetivo general

Desarrollar un prototipo eficiente para Laboratorios de conservación de alimentos, orientado a facilitar la programación y configuración de parámetros físicos (Temperatura y Oxígeno) para una cámara de atmósfera controlada de grandes dimensiones.

### 1.4.2. Objetivos específicos

#### a) Objetivos específicos de Diseño:

- Definir la variable a controlar como es el nitrógeno y monitorear las variables de temperatura, Oxígeno y Dióxido de Carbono.
- Diseñar e implementar un prototipo de cámara de atmósfera controlada que permita incorporar sensores de alta sensibilidad para su desarrollo.
- Garantizar la captura de datos a nivel de los sensores para la mejora y conservación del capsicum.
- Validar el protocolo de pruebas del prototipo.

#### b) Objetivos específicos de desarrollo:

- Diseñar el prototipo de cámara de refrigeración.
- Desarrollar un dispositivo electrónico para monitorear temperatura, Oxígeno y dióxido de Carbono del prototipo de cámara de refrigeración.
- Diseñar un prototipo de cámara de limpieza, donde se pueda inyectar nitrógeno con el objetivo de disminuir el dióxido de carbono del prototipo de cámara de atmósfera controlada.

- Diseñar un prototipo de cámara de atmósfera controlada que permita incorporar sensores digitales de alta sensibilidad de: Temperatura, oxígeno y dióxido de carbono.
- Validar el protocolo de pruebas a partir del apoyo de diferentes instrumentos que nos indicarán los valores obtenidos.

### 1.5. Importancia de la investigación

La solución propuesta traerá beneficios al cliente en los siguientes aspectos:

- Dar a conocer los aportes que realiza el laboratorio de análisis proteico en la agricultura.
- Implementación del laboratorio de análisis proteico con un nuevo equipo de investigación, recinto de atmósfera controlada.
- Facilitar la investigación de conservación de capsicum, para reducir las alteraciones y podredumbres a causa de los microorganismos, conservándolos de un ambiente de temperatura y humedad requerida (cada fruto se almacene a diferentes temperaturas).
- Beneficiar la prolongación del periodo óptimo de la conservación, respecto en atmósferas normales.

A nivel científico, tecnológico e ingenieril, la propuesta implica ejecutar los siguientes estudios, diseños e implementaciones:

- Conocimientos en termodinámica.
- Diseño y cálculo de cámaras de conservación.
- Cálculo de inyección de N<sub>2</sub>.
- Estudios y análisis de sensores de precisión, de temperatura, oxígeno y CO<sub>2</sub>.

a) Económicamente, el proyecto se justifica por:

- Prototipo de menor capacidad, tiene menor costo de inversión en el desarrollo de la investigación.
- Favorece al transporte de la exportación de Capsicum.

b) A nivel social, la propuesta busca lo siguiente:

- Introducción de gran variedad de Capsicum en el mercado.

c) En el aspecto ambiental el proyecto se justifica por lo siguiente:

- Disminución de aditivos químicos para la conservación.
- Implementación del recinto con gases naturales que no afecten la capa de ozono.

## 1.6. Viabilidad de la investigación o presupuesto

### 1.6.1. Viabilidad técnica

El proyecto se considera técnicamente viable ya que los conocimientos necesarios para el desarrollo del sistema se basan en los conocimientos que se ha ido adquiriendo en los diferentes cursos de la “Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de San Martín de Porres” (FIA\_USMP) en los campos de sistemas de control, sistema digital, circuitos electrónicos y arquitectura de computadores. Dichos conocimientos se utilizan en:

- Diseño de tableros de control.
- Implementación de sensores.

Además, el proyecto se considera técnicamente viable, ya que nuestra universidad dispone de los laboratorios e instrumentos necesarios, como osciloscopios, multímetros, módulos de proto placas, etc, para el desarrollo del sistema electrónico orientado a la conservación de frutos y especies de exportación.

Además, el proyecto es técnicamente viable ya que se pueden utilizar diferentes componentes, es decir, materiales con diferentes propiedades para satisfacer los requisitos del sistema electrónico, diferentes microcontroladores que están disponibles y son fácilmente accesibles en el mercado nacional.

### 1.6.2. Viabilidad económica

Se estima que la inversión en el diseño y desarrollo de la propuesta del sistema electrónico será de S/ 4485.00 Soles, pues cabe la posibilidad de importar los componentes con los que se trabajará, para el monto evaluado se considera el costo de todos los materiales y estructura física donde se va a ubicar sistema; además este monto valora la posibilidad de falla de algún material durante el proceso de la ejecución de los diferentes ensayos de estimación, por lo tanto se considera el 50% de un posible gasto extra, el cual también podrá ser afrontado por los autores del proyecto. Adjuntamos los cuadros económicos que va a generar el prototipo requerido por el cliente. En la Tabla. 2 se observa los costos ya realizados en el gabinete.

**Tabla 2**

*Costos de gabinete.*

COSTO GABINETE SOLES (S/.)		
Ítem	DESCRIPCION	S/.
1	01 PLANCHA ACERO INOXIDABLE 304 1/20" (2.40x1.20m)	150.00
2	01 PLANCHA GALVANIZADA 1/20" (2.40x1.20m)	50.00
3	1 GALON DE POLIURETANO	100.00
4	BURLETE DE PUERTA	30.00
5	GARRUCHAS (4 UNIDADES)	20.00
6	1 GALON DE PINTURA (GOST)	50.00
	TOTAL	400.00

Elaborado por: los autores

En la Tabla. 3 se observa los costos ya realizados en el sistema de refrigeración.

**Tabla 3***Costo sistema de refrigeración Soles (S/).*

<b>COSTO SISTEMA REFRIGERACION SOLES (S/.)</b>		
<b>Ítem</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>S/.</b>
1	UNIDAD CONDENSADORA Incluye, compresor, condensador. Moto ventilador, capilar	500.00
2	UNIDAD EVAPORADORA Incluye, serpentín, moto ventilador, cámara de expansión	300.00
3	SITEMA DE DESCONGELAMIENTO NO FROST Incluye, resistencia eléctrica, timer, bimetálico	150.00
5	TERMOSTATO	25.00
6	REGISTRADOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD	60.00
7	REFRIGERANTE R 134a (1/2 Kg)	20.00
	TOTAL	1055.00

Elaborado por: los autores

En la Tabla. 4 se observa los costos que se van a realizar para el sistema de inyección de Nitrógeno y extracción de Dióxido de Oxígeno.

**Tabla 4***Sistema de Inyección de Nitrógeno y extracción de Dióxido de Oxígeno.*

<b>COSTO SISTEMA INYECCION DE NITROGENO Y EXTRACCION DE AIRE(S/.)</b>		
<b>(Proyecto Ingeniería II)</b>		
<b>Ítem</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>S/.</b>
1	BOTELLA DE 2m3 DE NITRÓGENO	300.00
2	COMPRESOR PARA EVACUAR AIRE DE CÁMARA	400.00
3	MANÓMETROS Y MANGUERAS	150.00
2	VÁLVULA REDUCTORA-REGULADORA DE PRESIONES	500.00
3	VÁLVULA DE PASO MANUAL	40.00
4	VÁLVULA SOLENOIDE PARA NITRÓGENO	50.00
5	SENSOR DE OXÍGENO	180.00
6	SENSOR DE DIÓXIDO DE CARBONO	180.00
7	NITRÓGENO 2M3	40.00
8	TABLERO ELÉCTRICO EQUIPADO	150.00
	TOTAL	1990.00

Elaborado por: los autores

En la Tabla. 5 se observa un resumen del costo total para el recinto de atmósfera controlada.

**Tabla 5**

*Costo Total del Recinto de Atmósfera Controlada.*

COSTO TOTAL DE RECINTO DE ATMÓSFERA CONTROLADA(S/.)		
Ítem	DESCRIPCION	S/.
1	GABINETE	400.00
2	SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	1055.00
3	SISTEMA DE INYECCION DE NITRÓGENO	1930.00
4	MANO DE OBRA GABINE Y SISTEMA REFRIGERACIÓN	1000.00
5	MANO DE OBRA DE SISTEMA DE INYECCIÓN Y EXTRACCIÓN	500.00
	TOTAL	4885.00

Elaborado por: los autores

#### 1.6.3. Viabilidad social

El desarrollo del sistema electrónico orientado a la conservación de frutos de exportación permitirá que las pruebas y ensayos sobre distintas muestras durante un mayor rango de tiempo, sin perjudicar las características de las frutas y el tiempo del cliente o personas que vayan a operar el sistema; ya que el mencionado producto no depende del esfuerzo físico humano, al ser un proceso totalmente automatizado, dejando a decisión del operador el inicio y finalización del proceso de conservación según parámetros establecidos.

#### 1.6.4. Viabilidad Operativa

El desarrollo de la propuesta del sistema electrónico es viable a nivel operativo porque cumple los requisitos para cubrir las necesidades del laboratorio de Análisis Proteico del INIA.

El equipo no será invasivo sobre las diferentes muestras de frutos y especies porque el proceso se realizará bajo los parámetros establecidos para cada muestra; por lo tanto, no atentaría de

alguna forma a los resultados finales. Las medidas del equipo no afectan las limitaciones del laboratorio, por ende, se considera que el proyecto es viable durante su proceso operativo.

#### 1.6.5. Viabilidad Comercial

Al encontrarse una alta demanda de usuarios potenciales como el laboratorios y empresas dedicadas a la conservación de frutos y especies de exportación que están enfocadas en alargar la vida útil de los frutos, y considerando las características del proyecto como un sistema de automatización, se considera que la propuesta también es viable comercialmente.

## **CAPÍTULO II.**

### **MARCO TEÓRICO**

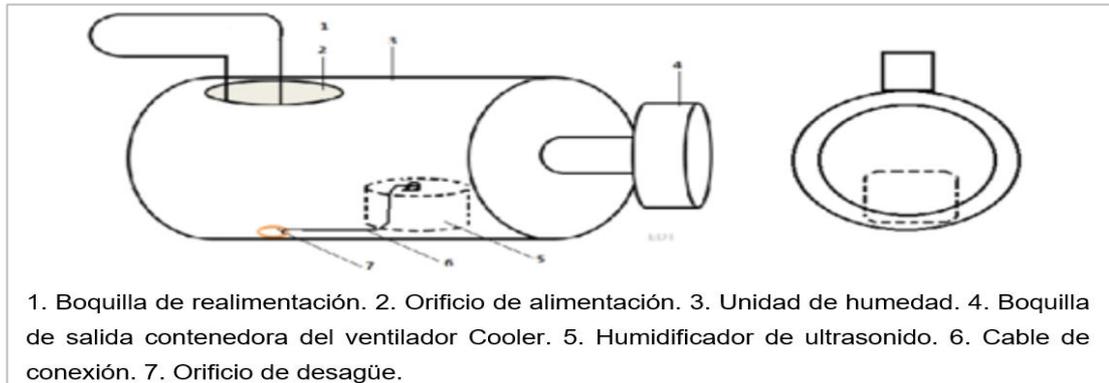
#### 2.1. Antecedentes de la investigación

Alzate y Guerrero, (2018), en su trabajo de investigación titulada “Diseño e implementación de un prototipo de control de humedad relativa para una cámara existente” desarrollaron y construyeron el diseño de un prototipo de cámara con el fin de simular y controlar las condiciones ambientales respecto a la temperatura y humedad relativa de un determinado espectro de operación Figura. 4, La metodología de la investigación consistió en revisar los protocolos de calibración de dispositivos disponibles en la literatura para medir la temperatura y humedad relativa.

En el estudio, se utilizó “un dispositivo patrón de la marca Fluke 5020 A para realizar las pruebas”. Resumiendo, se revisó la literatura sobre calibración de dispositivos para medir variables ambientales y se utilizó un dispositivo patrón de la marca Fluke 5020 A en el estudio, de esta manera cumpliendo con los requisitos técnicos a nivel nacional e internacional de las normas NTC-ISO/ICE 1 7025, en donde se establecen los estándares para el uso y manipulación de equipos y ensayos.

## Figura 4

### Unidad de humedad



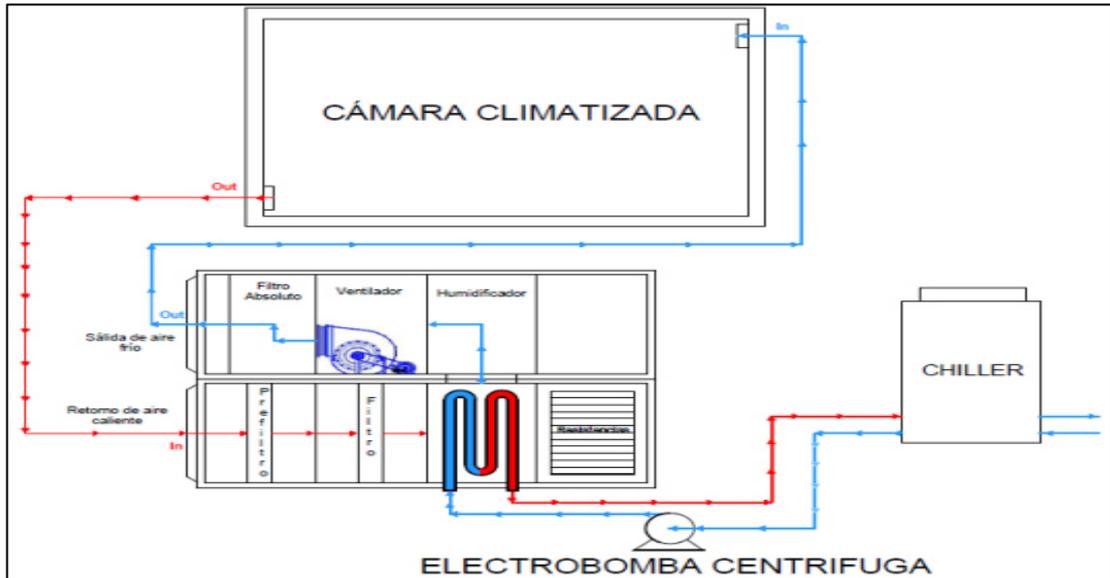
Fuente: Alzate y Guerrero, (2018)

Silva y Soto, (2019), en su trabajo de investigación titulada “Diseño de automatización de la cámara climatizada para pruebas de equipos y materiales” cuyo objetivo fue controlar las condiciones atmosféricas internas a través de un sistema automático, el dispositivo utilizado en el estudio estaba compuesto de instrumentos de medición, control y supervisión. El estudio también evaluó los requisitos establecidos por el reglamento (RETIQ) y las normas técnicas colombianas para la instrumentación y control de cámaras climatizadas en ensayos de refrigeración tanto domésticos como comerciales.

Los resultados de la investigación se procesaron a través de un modelo matemático propuesto en el trabajo, y se determinaron los parámetros relacionados con la climatización, la programación y los costos. Como resultados, el dispositivo utilizado consistía en instrumentos de medición, control y supervisión, y el estudio evaluó los requisitos para la instrumentación y control de cámaras climatizadas de acuerdo con normas técnicas colombianas específicas. Los resultados se procesaron mediante un modelo matemático y se determinaron parámetros relacionados con la climatización, la programación y los costos.

**Figura 5**

*Diagrama de bloques del proceso de enfriamiento y deshumidificación*



Fuente: Silva y Soto, (2019)

De la Vega, (2017), en su artículo titulado “Avances en Tecnología de Atmósferas Controladas y sus Aplicaciones en la Industria”. Esta investigación describe el proceso evolutivo tecnológico de atmósferas controladas y sus aplicaciones en el mundo real, así como también las perspectivas de investigación en diferentes áreas de estudio. Para ello, se ha realizado una revisión de datos sobre la aplicación de esta tecnología y su eficiencia como alternativa de tratamiento, y cómo afecta a “las características organolépticas y funcionales de ciertas frutas, su aroma y calidad potencial como antioxidantes y polifenoles”.

Además, se ha considerado la automatización y el monitoreo computarizado de la tecnología y cómo esto afecta a la electrónica. Como resultados, esta investigación se centra en la tecnología de atmósferas controladas y sus aplicaciones y perspectivas de investigación, y también examina cómo afecta a las características de ciertas frutas y cómo se puede automatizar y monitorear de manera computarizada. En el artículo evidencian que la tecnología ha demostrado mayor eficiencia a comparación con lo tradicional, concluyendo que, debido a las diferentes

alternativas de aplicación y su alta eficiencia tecnológica, se pueden desarrollar futuros estudios para complementar su desarrollo.

**Tabla 6**

*Condiciones de almacenamiento en atmósferas controladas de algunos productos.*

<i>Alimento</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Oxígeno (%)</i>	<i>CO<sub>2</sub> (%)</i>
Aceituna	8-12	2-5	5-10
Aguacate	5-13	2-5	5-10
Albaricoque	0-5	2-3	2-3
Banana Cavendish Madura	15	2	6-8
Banana Cavendish/Enana/Gran enana verde	15	2	6-8
Banana Gros Michel	12	5	5
Banana Latundan Madura	15	2	6-8
Banana Lacatan Verde	15	2	6-8
Banana Latundan Verde	15	2	6-8
Banana Poovan Verde	15	2	6-8
Cereza	0-5	0-5	10-12
Ciruela	0-5	1-2	0-5
Durazno, Melocotón	0-5	1-2	5
Fresa	0-5	10	15-20
Higo	0-5	5	15
Kaki, Caqui	0-5	3-5	1-8
Kiwi	0-5	2	5
Lechuga	0,5-1	2-5	<2
Lima	10-15	5	0-10
Limón Verde	10-15	5	0-5
Mango	8-15	5-10	5-6
Manzana	0-5	2-3	1-2
Melón Cantaloupe	5-10	3-5	10-15
Melón Honeydew Honey ball	10-12	3-5	0
Naranja Dulce	1-10	10-15	0-7
Papaya, Lechosa	10-15	10-15	0-7
Pera	0-5	2-3	0-1
Pimiento dulce/ ají/ Paprika	8-12	3-5	0-10
Piña Verde	10-15	5	10
Tomate Maduro Pintón	8-12	3-5	0
Tomate Verde	12-20	3-5	0
Toronja	10-15	3-10	5-10

Fuente: Barreiro y Sandoval (2006) citado por De la Vega (2017)

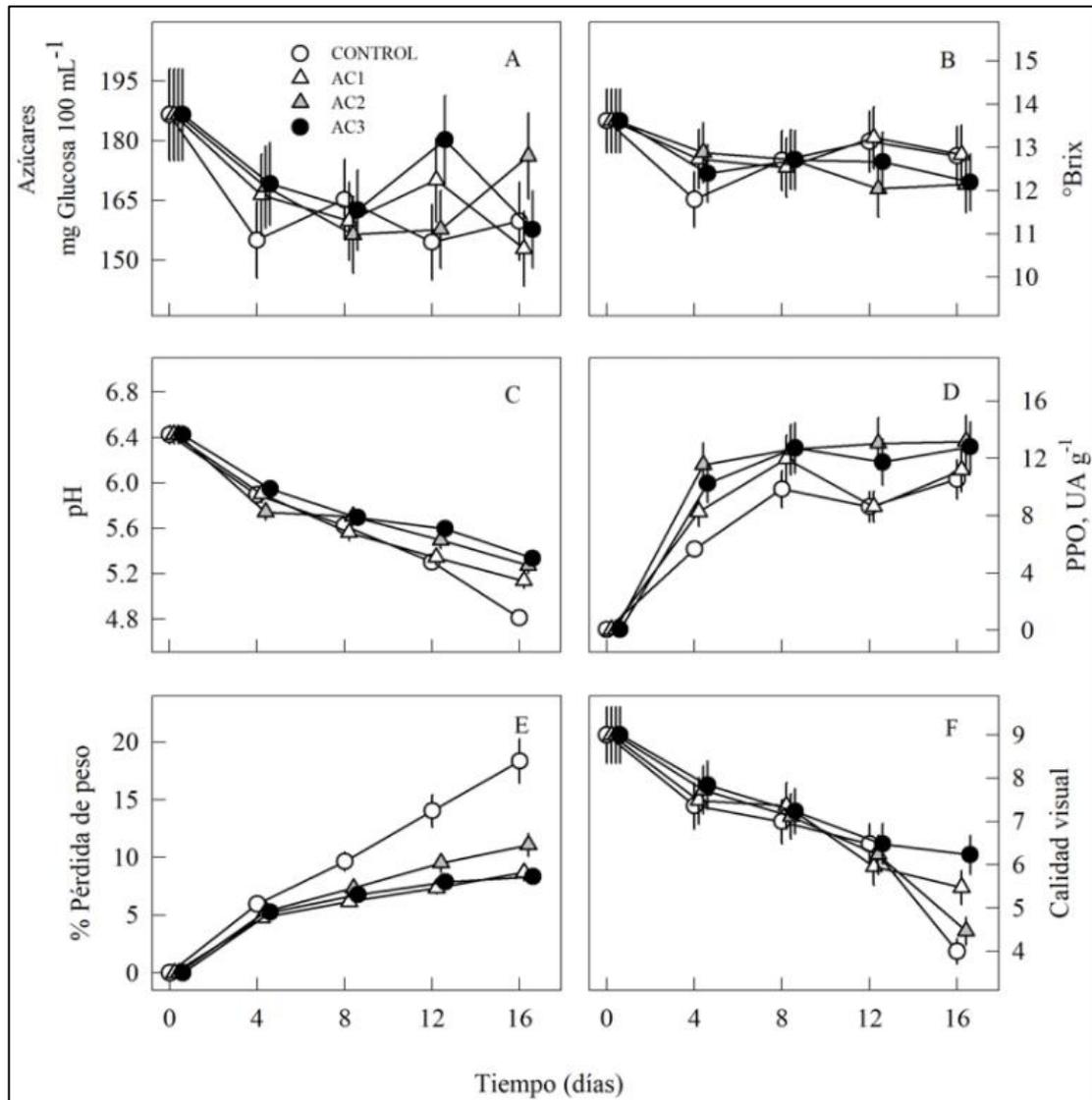
Alba, (2020), en su artículo titulado “Uso de atmósferas controladas para conservar la calidad de tuna roja” El estudio señala que la tuna es un fruto muy perecedero, que solo puede permanecer

fresca durante unos 9 a 15 días a temperatura ambiente. Por lo tanto, en el estudio se propusieron PMP y la utilización de AC para prolongar su vida postcosecha. Resumiendo, se menciona que la tuna es un fruto perecedero que tiene dificultades para ser consumido y comercializado debido a sus espinas, y se proponen soluciones como el consumo de PMP y el uso de AC para aumentar su durabilidad después de la cosecha.

En este estudio, se utilizaron tratamientos de atmósferas controladas en rodajas de tuna procesadas mínimamente a una temperatura de 5°C durante 16 días. Se evaluaron varias propiedades físicas y químicas de los frutos cada cuatro días, incluyendo el “contenido de azúcares totales (AT), sólidos solubles totales (SST), pH, y calidad visual (CV). Los resultados mostraron que el tratamiento con 10% CO<sub>2</sub> + 5% O<sub>2</sub> + 85% N<sub>2</sub> aumentó la CV, la PFP y el pH, mientras que el tratamiento con 10% CO<sub>2</sub> + aire aumentó el contenido de azúcar”. “El análisis multivariante de componentes principales mostró que el 85% de la variabilidad en las propiedades físicas y químicas de los frutos de tuna se puede explicar en dos componentes”. Los investigadores concluyen que “el uso de atmósferas controladas extendió la vida postcosecha de los frutos mencionados mínimamente procesados hasta por 16 días de almacenamiento”. En resumen, se utilizaron diferentes tratamientos de atmósferas controladas en rodajas de tuna procesadas mínimamente y se evaluaron sus propiedades físicas y químicas durante 16 días. Los resultados sugieren que estos tratamientos pueden mejorar la calidad visual, la pérdida de peso fisiológica y el pH, así como el contenido de azúcar, y que la atmósfera controlada puede prolongar la vida postcosecha de los frutos mencionados hasta por 16 días.

**Figura 6**

Valores promedio en *Opuntia ficus indica* mínimamente procesada.



Fuente: Alba, (2020)

Ospina y Cartagena, (2008), en su investigación titulada “La atmósfera modificada: una alternativa para la conservación de los alimentos”, El almacenamiento en atmósfera modificada “es una técnica de envasado de alimentos que implica el uso de materiales de barrera de difusión gaseosa para crear un ambiente con alto contenido de CO<sub>2</sub> y bajo contenido de O<sub>2</sub>” (Tabla 7). “Esto se hace para reducir la respiración y el crecimiento microbiano, con ello aumentar la vida útil del producto”.

**Tabla 7***Intensidad de transmisión de O<sub>2</sub> y vapor de agua de materiales.*

Película de empaque (25μ)	Intensidad de transmisión de O <sub>2</sub> (cm <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> .día.atm) 23°C 0%HR	Permeabilidad relativa a 23°C 0%HR	Intensidad de transmisión de vapor de agua (g/m <sup>2</sup> .día) 38°C 90%HR*	Intensidad relativa de transmisión de vapor de agua a 28°C 90%HR
Polietileno de baja densidad (LDPE)	5.000-10.000	Alta	16-24	Semibarrera
Polipropileno (PP)	3.000-3.700	Baja	10-12	Semibarrera
Polipropileno orientado (OPP)	2.000-2.500	Baja	7	Barrera<10
Cloruro de polivinilo (PVC)	2.000-50.001	Baja	2.001	Muy alta
Poliéster (PET)	50-100	Baja	20-30	Semibarrera

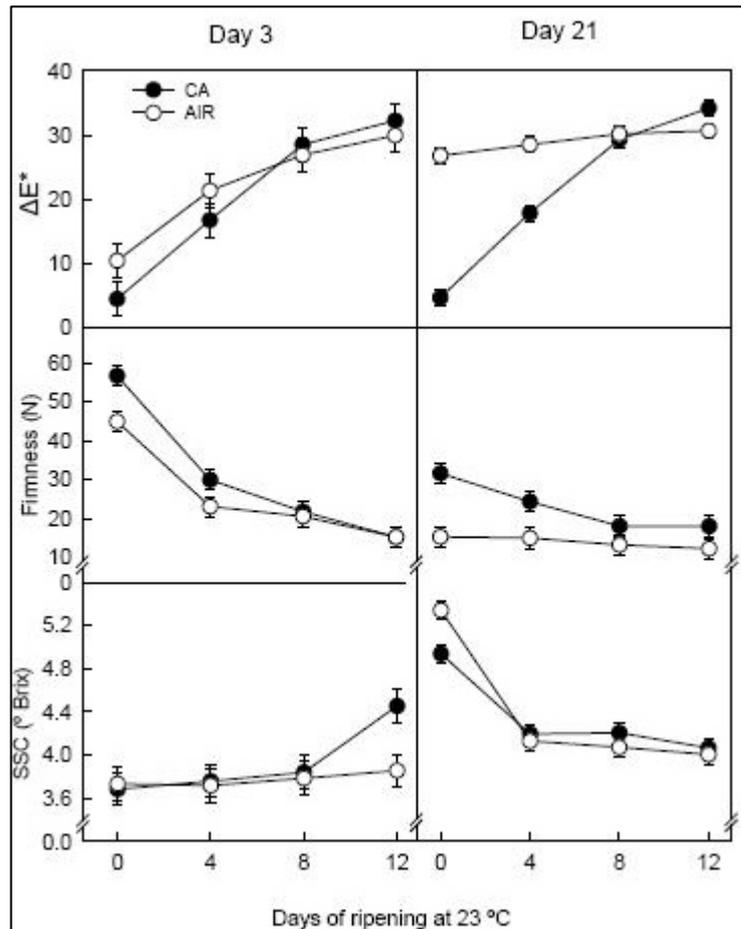
\* Las medidas de la transmisión de O<sub>2</sub> y vapor de aguas no son reales con las condiciones de refrigeración.

Fuente: Alba, (2020)

López et al. (2011), en su trabajo de investigación titulada “Efecto del almacenamiento en atmósfera controlada sobre la calidad postcosecha y nutricional del tomate” Los investigadores evaluaron el impacto del almacenamiento en atmósfera modificada en la maduración de los tomates rojos. Se evaluaron varias propiedades, como el color, contenido sólidos solubles, y de ciertos pigmentos. Los resultados mostraron que el almacenamiento en atmósfera modificada redujo “la pérdida de firmeza y la degradación del ácido ascórbico y también redujo la formación de CO<sub>2</sub> y etileno y la síntesis de pigmentos”. Además, retrasó la formación de color rojo y la maduración en comparación con el almacenamiento en condiciones de refrigeración convencional. En conclusión, “el almacenamiento en atmósfera modificada puede ser una alternativa útil para prolongar la vida útil y el tiempo de preparación de los tomates rojos”.

**Figura 7**

*Cambios en color y sólidos solubles totales (SST)*



Fuente: López et al. (2011)

Rodríguez et al. (2015), en su investigación titulada "Evaluación de bolsa atmósfera modificada y concentraciones de anhídrido sulfuroso en arándano" que incluyó seis tratamientos obtenidos mediante la combinación de la AM (con y sin) y distintas configuraciones de dióxido de azufre (inducidas con 0, 1 y 2 g de metabisulfito de sodio) durante 7, 14, 21 y 28 días a 0 °C. Los resultados mostraron que la utilización de una bolsa de AM se redujo consistentemente ( $p \leq 0,05$ ), pérdida de masa por deshidratación (4%) en comparación con los tratamientos en los que el uso de tecnología no fue aplicado. Los sólidos no fueron afectados y se mantuvieron entre el 13 y 14%. Asimismo, "la incidencia de la pudrición gris se redujo significativamente ( $p \leq 0,05$ ) mediante el uso de dióxido de azufre en la bolsa de atmósfera modificada y el efecto de interacción de los dos factores"; sin embargo, el gas causó daños por blanqueamiento, que fue del

11,66% en la dosis de 2 g de metabisulfito sódico tras 28 días de almacenamiento. Concluyen que la utilización de bolsa de AM disminuyó consistentemente ( $p \leq 0,05$ ) la pérdida de masa por deshidratación (4%) con relación a los tratamientos en el que la “tecnología no fue utilizada, la concentración de sólidos solubles no fue afectada por los tratamientos, y se mantienen en 13y14%”.

**Tabla 8**

*Tratamientos utilizados en el experimento.*

Tratamientos	Bolsa atmósfera	Dosis $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ (g)
T1(Control)	Sin bolsa	0
T2	Sin bolsa	1
T3	Sin bolsa	2
T4	Con bolsa	0
T5	Con bolsa	1
T6	Con bolsa	2

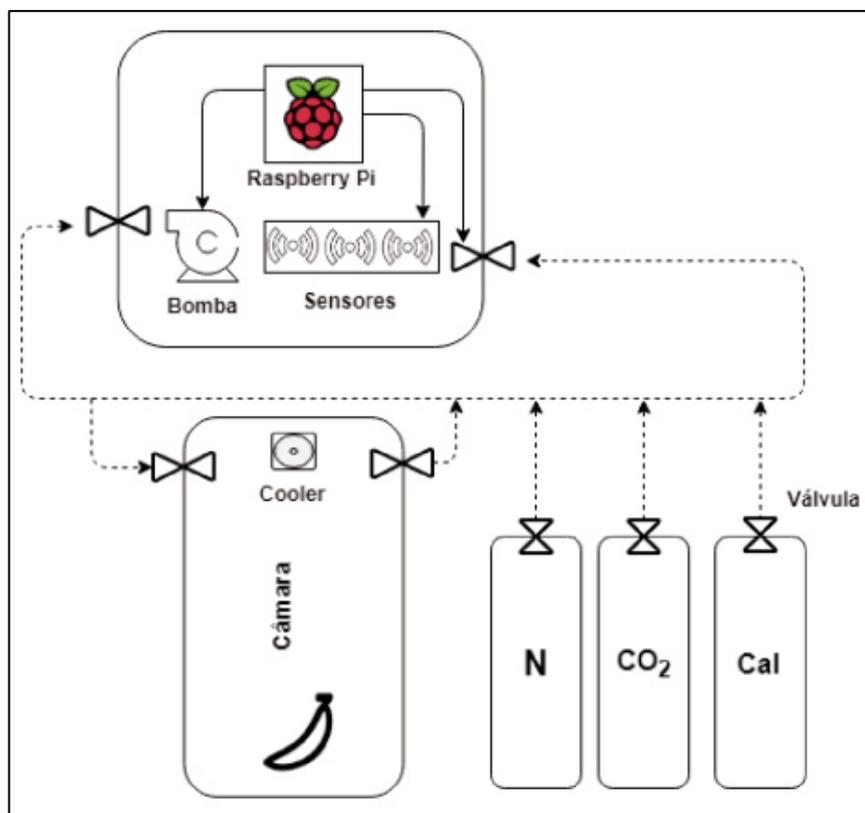
Fuente: Rodríguez et al. (2015)

Crotti, (2020), en su trabajo de investigación titulada “Impacto del uso de las nuevas tecnologías de la información y la comunicación en calidad de frutos conservados en atmósfera controlada” señala que, “la implementación de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones está presente en el las más diversas áreas del conocimiento, entre ellas la agricultura”. Entre las técnicas existentes para la agricultura, “una que ha ido ganando protagonismo en los últimos años es la Agricultura de Precisión”. Para ello, se desarrolló un prototipo utilizando sistemas informáticos, Raspberry Pi, sensores y actuadores Figura. 8, donde es posible monitorizar y controlar cámaras de almacenamiento. Estos componentes se instalaron en un frigorífico sistema de almacenamiento de fruta, con el fin de implementar 5 tratamientos en almacenamiento utilizados en este trabajo fueron: ambiente refrigerado, atmósfera controlada con control estático (2% de  $\text{O}_2$  y 7% de  $\text{CO}_2$ ), atmósfera dinámica controlada con cociente respiratorio estático, atmósfera controlada dinámica con cociente

respiratorio dinámico, atmósfera controlada con control inteligente (“2% de  $O_2$  y 7% de  $CO_2$ ”). Para validar la investigación, se evaluó el almacenamiento de bananos "plateados" en todos los tratamientos con el fin de comparar los requisitos técnicos y la calidad de la fruta, al final de la investigación. En la investigación se concluye que “el uso de las nuevas tecnologías de la información y la comunicación tiene ventajas en el almacenamiento de frutas”. El trabajo demostró el impacto en la calidad y tiempo de conservación de frutos.

**Figura 8**

*Diagrama general del prototipo*



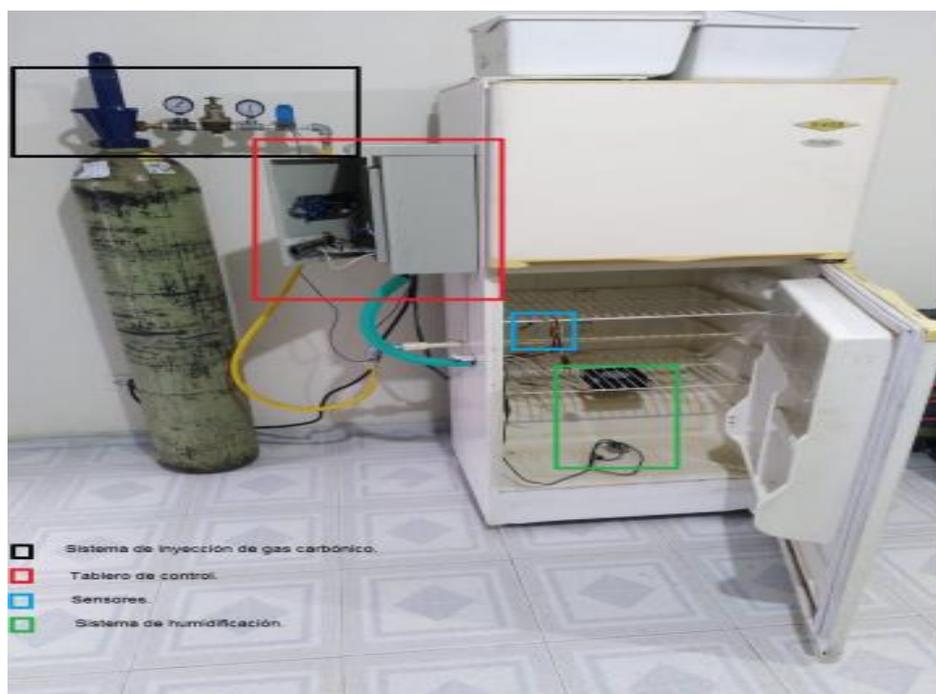
Fuente: Crotti, (2020)

Sierra, (2019), en su trabajo de investigación titulado “Desarrollo de una cámara de atmósfera controlada para la conservación de alimentos en fresco” señala que a raíz de diferentes problemas que afectan a la industria agrícola colombiana por la pérdida de alimentos perecederos en la investigación se plantea como objeto de estudio la “adaptación de un refrigerador comercial, a través del cual se controla la

humedad y mezcla de gases del aire, control de temperatura para incrementar el tiempo de conservación de frutos en fresco disminuyendo la tasa de respiración (Figura. 9). La utilización de atmósferas controladas a través de un sistema de enfriamiento, humidificación por ultrasonido (CO)<sub>2</sub> comparado con otras técnicas (LO, ULO, HLO y control de etileno) para el control del ambiente. La implementación de microcontroladores, sensores y actuadores compatibles con Arduino para automatizar el proceso, se disminuye sustancialmente los costos comparados con otro tipo de controladores, siendo el proyecto de fácil acceso a mayor cantidad de comunidades. En la investigación señalan que “Los resultados de la calidad de los alimentos se validan mediante normas técnicas colombianas para cada tipo de cultivo, que consiste en muestras de dureza, forma y color para un adecuado control de calidad”. El desarrollo del proyecto se realizó en dos etapas: primero, la obtención de requerimientos técnicos basado en literaturas e investigaciones, y segundo, la construcción de un dispositivo físico, y una etapa de validación de los resultados obtenidos según la normativa vigente.

### Figura 9

*Esquema de la cámara de atmósfera controlada.*



Fuente: Sierra, (2019)

Pinto et al., (2016), en su artículo titulado “Conservación bajo atmósferas controladas en frutas y hortalizas” Los autores mencionan que “la tecnología de Atmósferas Controladas se ha desarrollado para aumentar la longevidad de la conservación de frutas y hortalizas frescas y se describe como la modificación de la concentración de los gases principales como O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y en algunos casos N<sub>2</sub>, con el objetivo de reducir la velocidad de maduración” (Tabla 9).

**Tabla 9**

*Clasificación de los cultivos hortícolas.*

Duración Almacenamiento (Meses)	Cultivo Hortícola
> 12 Meses	Almendras, nuez de Brasil, anacardo, avellana, nueces de macadamia, pacanas, pistacho, nuez, frutas secas y vegetales.
De 6 a 12	Algunas variedades de manzanas y peras europeas.
De 3 a 6	Repollo, col china, kiwi, caqui, la granada, algunos cultivares de peras asiáticas.
De 1 a 3	Aguacate, plátano, cereza, uva (sin SO <sub>2</sub> ), mango, aceitunas, cebolla dulce (cultivares), algunos cultivares de nectarina, el melocotón y la ciruela, tomate (verde-maduro)
< 1 Mes	Espárragos, brócoli, bayas de caña, higo, lechuga, melones, papaya, piña, fresa, maíz dulce, frutas y verduras recién cortadas, algunas flores cortadas

Fuente: Kader (1998) citado por Pinto et al., (2016)

Montoya, (2005), en su investigación titulada “Tecnología de atmósferas controladas para frutas y hortalizas”, La tecnología de atmósferas controladas (AC) se utiliza para mantener la

calidad óptima de productos hortofrutícolas almacenados en cuartos fríos o transportados en contenedores. Esta técnica mantiene una atmósfera específica alrededor del producto, ajustando los niveles de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> según sea necesario para la variedad vegetal en cuestión. Esta es una técnica innovadora especialmente para la conservación de la variedad Hass del aguacate (*Persea Americana*), que es una fruta climatérica de exportación mundial.

Artés, (2006), en su investigación titulada “El envasado en atmósfera modificada mejora la calidad de consumo de los productos hortofrutícolas”. “La vida útil de los productos vegetales frescos puede prolongarse mediante el almacenamiento en frío y el envasado en una atmósfera modificada (MAP) que contenga bajos niveles de O<sub>2</sub> y/o altos niveles de CO<sub>2</sub> y vapor de agua en comparación con el aire”. Al ajustar la MAP a las necesidades específicas de cada producto, se puede prolongar su vida útil, reducir pérdidas y daños, mejorar su calidad y aumentar la seguridad del consumidor. La MAP también puede reducir la necesidad de tratamientos químicos posteriores a la cosecha, pero su uso inadecuado puede causar cambios fisiológicos o fúngicos o provocar una maduración anormal o sabores y aromas inusuales. Se recomienda desarrollar un diseño de envase adecuado junto con un modelo matemático que vincule los parámetros fisiológicos de las hortalizas con los parámetros técnicos del envase.

Villanueva, (2014), en su trabajo de investigación titulada “Conservación del mango envasado en atmósfera modificada” En este estudio, “se investigó el efecto de almacenar y envasar frutos de mango (*Mangifera indica L.*) mínimamente procesados a bajas temperaturas y en una atmósfera modificada (AM) pasiva, utilizando envases de polietileno de baja densidad (LDPE) M<sub>1</sub> y M<sub>2</sub>, con el objetivo de mantener la calidad comercial y vida útil para el consumo”. Al final del estudio, después de 28 días, se realizaron análisis microbiológicos.

Candan y Calvo, (2016), en su artículo titulado: “Atmósferas controladas dinámicas para el control de la escaldadura

superficial en peras” En esta investigación, se buscó una tecnología que permitiera controlar los problemas de conservación y almacenamiento de las peras, debido a las restricciones en el uso de antiescaldantes tradicionales. Los resultados indicaron que la atmósfera controlada (ACD) es “una herramienta eficaz para el almacenamiento de peras, pero que el desarrollo de cavernas impide su recomendación en el caso de las peras *Beurré D’Anjou*”.

Obando et al, (2015), en su trabajo de investigación titulada "Efecto de la atmósfera controlada sobre la calidad postcosecha y la longevidad del fruto de *Persea americana* 'Aguacate' var. Hass" afirma que "se determinó el efecto de diferentes concentraciones de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> (CA) sobre la calidad postcosecha y la longevidad del fruto de *Persea americana* 'Aguacate' var. Hass". "Se utilizó un sistema de CA con tubos unidos a recipientes herméticos a los que se aplicaron tres concentraciones de gas y un grupo de control (atmósfera convencional). "Los frutos se almacenaron a 6 °C y se evaluó su calidad a los 28 y 35 días después del almacenamiento en frío: aspecto externo (color de la piel y daños en el cristalino), firmeza, secado y vida útil a 20 °C (aspecto externo e interno). "El T3 (5 %O<sub>2</sub> -10 %CO<sub>2</sub>) mostró mejores parámetros de calidad en comparación con los otros tratamientos (mejor color de la piel, menos daños en el cristalino; además, se mantuvo la resistencia de la pulpa a la compresión y se redujeron los daños fisiológicos y la podredumbre)." El estudio concluyó que “la concentración (5%O<sub>2</sub> - 10%CO<sub>2</sub>) prolongaba la vida útil de 28 a 35 días en condiciones de arranque en frío y de 28+5 a 35+9 días en condiciones de almacenamiento. El uso de AC es una técnica de conservación prometedora para mantener las características de calidad y prolongar la vida útil de los aguacates." (Tabla 10)

**Tabla 10**

*Efecto de diferentes concentraciones de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> (AC) sobre la calidad post-cosecha y tiempo de vida útil de frutos.*

Tratamiento	Días Almc.	Color Cáscara			Ap. Externa			Firmeza	
T0: Control	Inicial	2.0	a	Verde bosque	1.9	a	25% daño	54.8	c
	28 días	3.5	d	40% negra/roja	1.9	ab	25% daño	6.3	a
	35 días	3.4	cd	>20% negra/roja	2.4	abc	>25% daño	4.7	a
T1: 5%O <sub>2</sub> - 5%CO <sub>2</sub>	Inicial	2.0	a	Verde bosque	1.9	a	25% daño	54.8	c
	28 días	2.1	a	Verde Bosque	1.8	a	25% daño	52.9	bc
	35 días	2.0	ab	Verde Bosque	2.2	abc	>25% daño	51.8	b
T2: 10%O <sub>2</sub> -10%CO <sub>2</sub>	Inicial	2.0	a	Verde bosque	1.9	a	25% daño	54.8	c
	28 días	1.9	ab	Verde Bosque	2.0	abc	25% daño	54.0	bc
	35 días	1.9	ab	Verde Bosque	2.3	abc	>25% daño	52.1	b
T3: 5%O <sub>2</sub> -10%CO <sub>2</sub>	Inicial	2.0	a	Verde bosque	1.9	a	25% daño	54.8	c
	28 días	1.9	ab	Verde Bosque	2.1	abc	25% daño	55.1	c
	35 días	1.9	ab	Verde Bosque	2.4	abc	>25% daño	53.1	bc
F de Fisher									
Tratamiento (1)		***			NS			***	
Día de almc (2)		***			***			***	
(1) x (2)		***			NS			***	

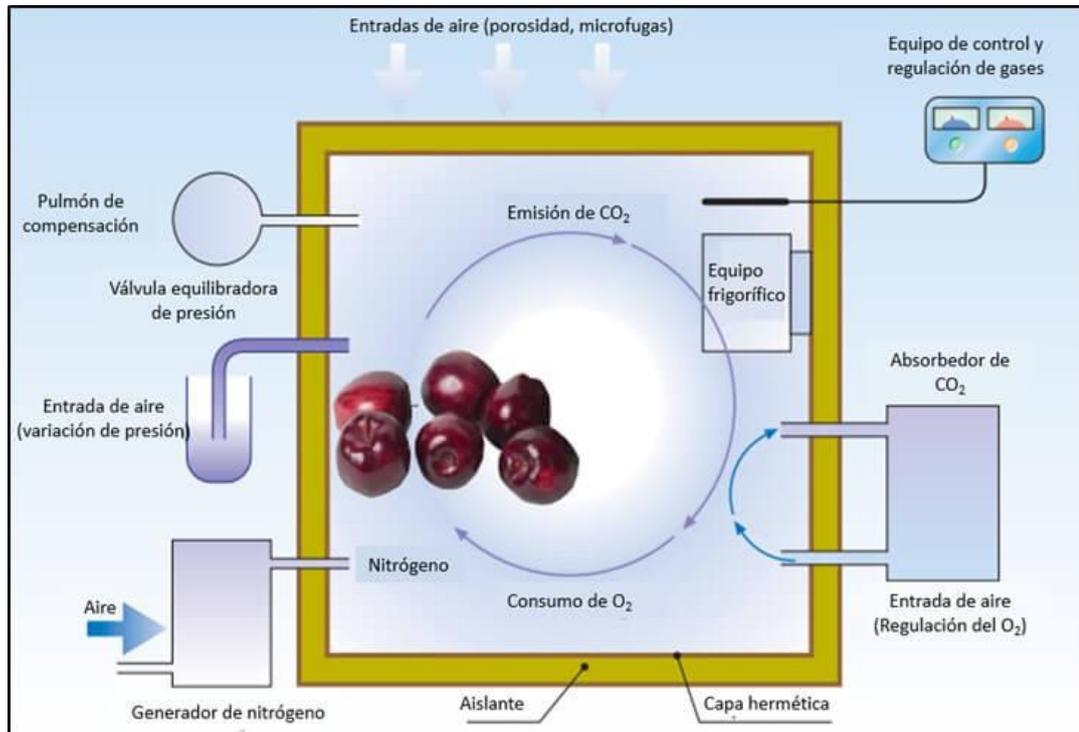
Letras distintas en sentido vertical indican diferencias significativas al 5%. NS,\*,\*\* No Significativo o significativo a p<0.05 y 0.01 respectivamente

Fuente: Obando et al, (2015)

INTAGRI, (2017), en su artículo titulado “Atmósfera postcosecha controlada y modificada”: la atmósfera controlada consiste en el almacenamiento alimentos como frutas y verduras en cámaras frigoríficas herméticamente cerradas en las que la atmósfera original “se sustituye por una atmósfera con un bajo contenido de oxígeno (=2) y un alto contenido de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), la atmósfera se controla durante todo el almacenamiento del producto, la composición de la atmósfera” depende de los requisitos del producto almacenado y su nivel “se consigue mediante la temperatura, la humedad relativa y la circulación del aire en la cámara”. Una atmósfera controlada es adecuada en una mezcla con refrigeración o bajas temperaturas. Para ello, en la figura 10 se muestra un esquema de una cámara de atmósfera controlada para la conservación de fruta almacenada.

**Figura 10**

*Esquema de una cámara de atmosfera controlada.*

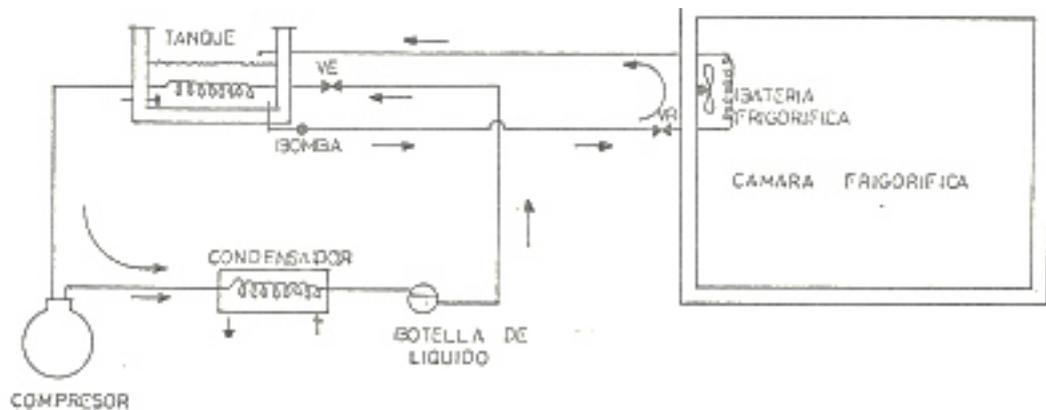


Fuente: INTAGRI (2017)

Andino, (2017), en su trabajo de investigación titulado “Cálculo y diseño de cámaras frigoríficas con atmósferas controladas” En este artículo se describe el proceso de diseño y cálculo de cámaras frigoríficas con atmósfera controlada (AC). Para ello, se calcularon sus dimensiones en función de la producción de manzanas y peras y se desarrolló la forma de construcción de las mismas, utilizando materiales que garantizaran la estanqueidad de las cámaras y evitaran la filtración de gases al medio ambiente. Una vez construidas las cámaras AC, se seleccionó “el refrigerante y el sistema de refrigeración, y se calculó y seleccionó la máquina de refrigeración en base a los cálculos de carga y las características del circuito”. Se presentan esquemas de sistemas con refrigeración indirecta y directa en las figuras 11 y 12.

**Figura 11**

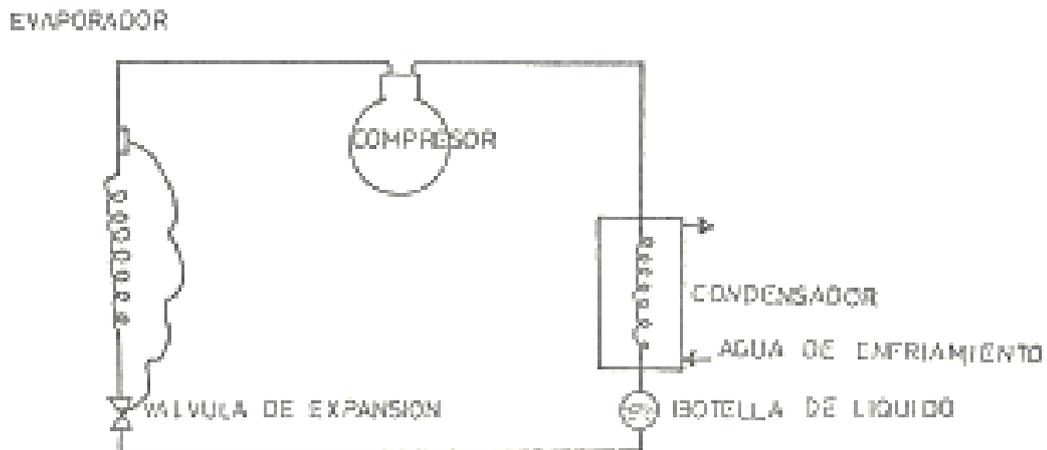
*Esquema de un sistema de refrigeración indirecta.*



Fuente: Andino, (2017)

**Figura 12**

*Esquema de un sistema de refrigeración directa.*



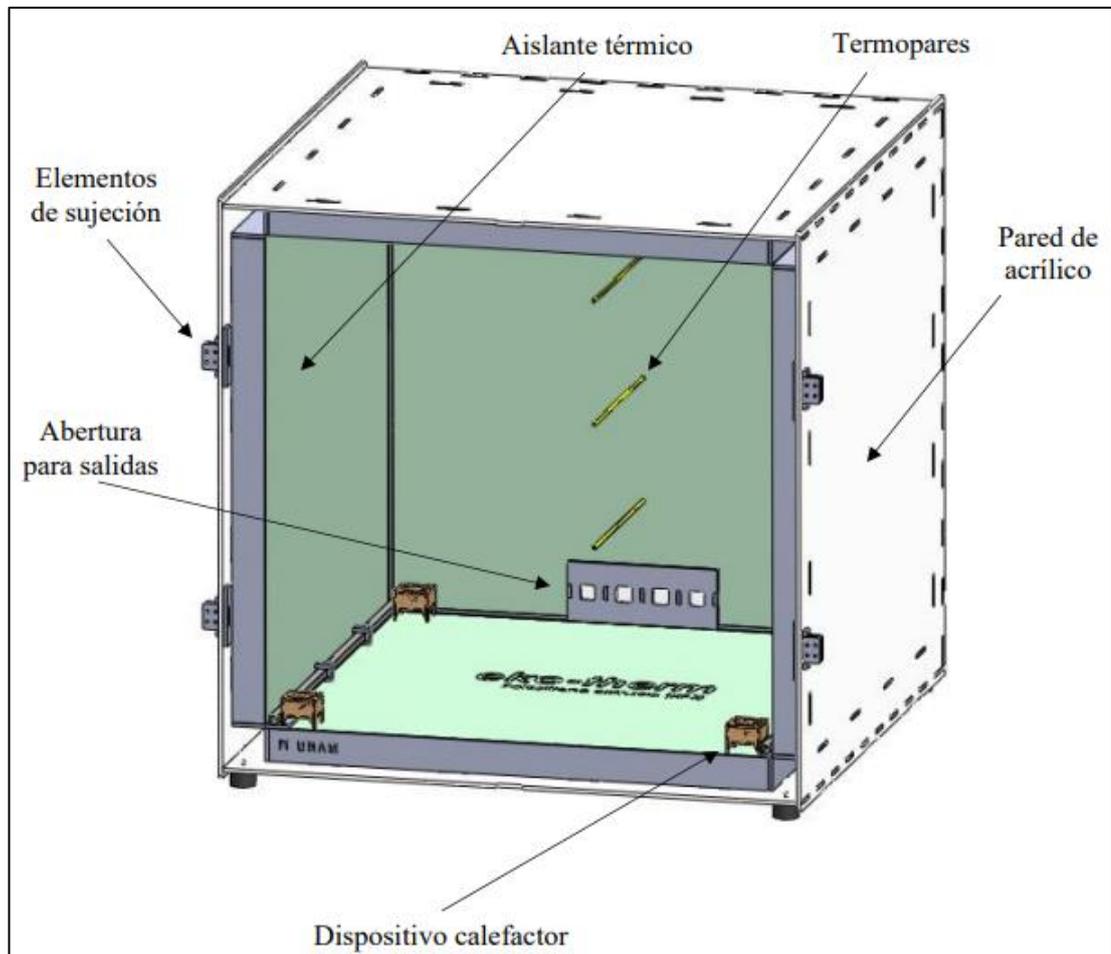
Fuente: Andino, (2017)

Ruiz, (2016), en su trabajo de investigación titulado “Diseño y construcción de una cámara de temperatura controlada” Se construyó una cámara de temperatura controlada para el laboratorio de termo fluidos de la UNAM. Esta cámara está aislada térmicamente y “puede mantener una temperatura específica mediante un sistema de control On-Off que enciende o apaga dispositivos calefactores”. Los resultados mostraron que la cámara tuvo más ciclos de calentamiento y enfriamiento teóricos que experimentales durante un período de tiempo específico. Esto se debió a la incertidumbre en los valores de los coeficientes convectivos y al hecho de

que se ignoró la resistencia térmica de contacto entre los materiales de la cámara. (Figura 13)

### Figura 13

*Diseño CAD de la cámara de temperatura controlada.*



Fuente: Ruiz, (2016)

Hernández et al. (2021), en su artículo titulado “Sistema de atmósfera controlada para la conservación de la manzana” Los ambientes controlados dinámicamente (ACD) y el uso de 1-metilciclopropeno (1-MCP) son tecnologías de postcosecha avanzadas. 1-MCP inhibe el efecto del etileno al unirse al receptor y evitar que el etileno también se una, lo que impide la madurez de la fruta. El ACD mantiene el nivel de oxígeno ( $O_2$ ) en el nivel más bajo que la fruta puede tolerar. Para ello, la monitorización se realiza con sensores que ajustan periódicamente el nivel, y la atmósfera controlada se considera una de las tecnologías más utilizadas para retrasar

la maduración de los alimentos". La Figura 14 muestra las cámaras de atmósfera controlada de Corneliu Letkeman Wiebe de Chihuahua, mencionadas en el artículo.

#### **Figura 14**

*Cámaras con atmósfera controlada.*



Fuente: Hernández et al. (2021)

Carboneli, (2017) en su trabajo de investigación titulado: "Diseño y cálculo de una nave hortofrutícola destinada al almacenamiento y procesado del caqui" El proyecto consiste en ampliar las instalaciones de la Cooperativa Agrícola de Algemesí COPAL con "un almacén equipado con cámaras frigoríficas y atmósferas controladas especialmente diseñadas para conservar y procesar el caqui de la cooperativa". El edificio incluye una zona de recepción y distribución de mercancías, cámaras frigoríficas, oficinas y espacio para vestuarios y baños para empleados. La estructura de acero de 800 metros cuadrados del edificio se calculó y dimensionó junto con los sistemas de saneamiento, fontanería y refrigeración.

Cardona y Pazos, (2013), en su tesis titulada "Cámara ambientalmente controlada para la supervivencia de plantas e insectos", el proyecto busca "controlar la temperatura y la humedad en la cámara del GRAIN, que originalmente se utilizó como cámara cárnica y permite crear un ambiente adecuado para el crecimiento de plantas e insectos". Esto se hace para "mejorar las condiciones de crecimiento al realizar experimentos de interés para la industria agrícola". Como resultado final, "se creó una interfaz gráfica tanto en el PLC como en el PC que

permite establecer condiciones determinadas de temperatura y humedad dentro de la cámara sin la necesidad de utilizar un computador externo para controlarla”.

Rojas, (2016), en su tesis titulada "Diseño de un controlador PID para el control de una unidad de ósmosis inversa de agua de mar", informan de que, tras desacoplar la unidad de ósmosis, se diseñaron controladores PID avanzados basados en el método MIGO, se simuló el sistema de control PID-MIGO en Matlab/Simulink en diversas condiciones nominales de funcionamiento con perturbaciones y señales perturbadoras, y se obtuvieron los resultados esperados de control y estabilidad que superan a los controladores PID convencionales. A continuación, se propuso una implementación práctica del sistema de control desarrollado mediante PLC, ordenador y servidor cliente OPC.

Reyes, (2008) en su tesis titulada “Automatización del sistema de control y monitoreo de una autoclave para el proceso de vulcanización del caucho” con el objetivo de “diseñar e implementar un equipo que pueda controlar la presión, temperatura y tiempo en una autoclave y permitir una interacción automática de los actuadores para obtener niveles adecuados de consignas”. El equipo debe tener un diseño sencillo y fácil de usar por cualquier trabajador de la empresa. Los resultados muestran que la autoclave se puede controlar completamente de forma automática y que el sistema de monitoreo ayuda al operario a controlar la máquina de forma fácil. También se demuestra que los controladores funcionan bien.

García et al., (2006), en su tesis titulada “Diseño e implementación de un controlador de temperatura y monitoreo de señales para la automatización de equipos de refrigeración” señala como objetivo principal es “Desarrollar un controlador para la automatización de equipos de refrigeración” debido a experiencias adquiridas se “determinó los refrigeradores en aplicaciones comerciales en pequeñas y grandes empresas”. Que funcionan generalmente de manera mecánica, la máquina es manejada por el operario, por lo que hay muy poca manipulación y

contacto humano sin conocimiento del operario hasta que se produce un error. El documento concluye: "Gracias a la ejecución del proyecto, la temperatura está controlada y se vigila continuamente, permitiendo una mejor opción para conservar los productos.

Ortiz (2016) en su tesis titulada "Diseño y análisis comparativo de un sistema de control de temperatura con lógica difusa vs control proporcional integral derivativo (PID)", en esta tesis se compararon dos sistemas de control de temperatura en un prototipo de torre de enfriamiento: uno basado en lógica difusa y otro en control proporcional-integral-derivativo (PID). Se utilizó "una tarjeta de adquisición de datos y el software MATLAB para procesar y analizar los datos recogidos por un sensor. Los resultados mostraron que ambos sistemas fueron capaces de regular la temperatura entre 55 y 60°C", pero el rango de variación y tiempo de estabilización fueron mayores en el sistema de lógica difusa. Sin embargo, el valor medio del error fue similar en ambos sistemas. Se determinó que la planta se ajustaba mejor al modelo BOX JEnkin y que el controlador PID funcionaba mejor que el controlador difuso cuando se variaban el valor deseado y las variables de perturbación.

Sailema, (2020), en su tesis titulada "Sistema de control basado en el método de lógica difusa para optimizar el funcionamiento de un horno eléctrico utilizado en el proceso de ensuelado para la fabricación artesanal de calzado" Se identificó "un problema de sincronización de tiempos y control inadecuado de la temperatura en el horno reactivador del taller de fabricación artesanal de calzado, lo que ha causado pérdidas económicas y falta de competitividad para la empresa. Se propuso usar un controlador difuso regular y controlar la temperatura en el horno para sincronizar el tiempo de calentamiento de la suela. Como resultado, se logró optimizar el proceso de ensuelado al controlar de manera eficiente la temperatura de las suelas y evitar la pérdida o quema de las mismas, además de reducir en un 70% el tiempo de proceso de reactivación de la suela".

Armas, (2017), en su tesis titulada "implementación de un controlador PID para la regulación del nivel de un recipiente abierto (Secador SO-1)", el objetivo principal se plantea como "Implementación de un controlador PID en las instalaciones de una planta industrial", pero para fines demostrativos de este trabajo, se construyó un prototipo de planta industrial en el que se implementó este controlador PID". En el trabajo se concluye "que se logró obtener los parámetros de sintonía ( $K_p$ ,  $T_d$  y  $T_i$ ) del controlador modelando la planta, por el método analítico".

Carreño (2013), en su tesis titulada "Sistema de control y monitorización de un tanque biorreactor en un proceso hidrometalúrgico" se refiere a un proceso de extracción por lixiviación de cobre en una planta hidrometalúrgica que requiere la irrigación del mineral con una solución ácida que contiene una concentración de bacterias con el fin de lograr una mayor eficacia, reducir el tiempo total de irrigación y facilitar la separación del cobre de la roca". En el proyecto se detallan las consideraciones de control y supervisión de la automatización".

Rodríguez (2011), en su tesis titulada "Diseño del sistema de control difuso de una máquina secadora de café con el uso de energía solar" El sistema de control permite la entrada de aire caliente en la cámara de calentamiento a través de un colector solar cilíndrico parabólico que refleja el aire hacia la cámara. "El aire se calienta a una temperatura superior a  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lo que hace que la temperatura del aire de salida sea de  $60\text{-}65\text{ }^{\circ}\text{C}$  con una humedad relativa del  $12\%$ ", condiciones ideales para el secado de café. Los resultados muestran que el aire alcanzó las condiciones adecuadas para el secado de café y que el algoritmo de lógica difusa utilizado responde a la dinámica del proceso y puede ajustarse a las condiciones requeridas por el sistema.

Vargas (2016), en su tesis titulada "Sistema electrónico de estabilización de cámara digital para fotogrametría mediante vehículo aéreo no tripulado" señala que "la mala gestión del suelo en las actividades agrícolas, unida a condiciones meteorológicas adversas, induce procesos erosivos que deterioran las condiciones del suelo y contaminan los

acuíferos circundantes, y un método para cuantificar la erosión son las parcelas de escorrentía. Debido a la complejidad de la recogida de datos, las parcelas proporcionan una precisión baja y son un método muy invasivo porque se requiere una cantidad significativa de suelo para establecer las parcelas. También señala que para tomar fotografías de buena calidad suele ser necesario un sistema de estabilización para las cámaras digitales. En el caso concreto de este proyecto, el objetivo es desarrollar un sistema electrónico de estabilización para la cámara digital que compense los movimientos del sistema no tripulado. El objetivo es reducir el error causado por el cambio en los ángulos de Euler cuando el sistema se mueve en el aire, para obtener imágenes digitales con información más fiable y sin distorsión óptica.

Diez, (2012), en su trabajo de tesis titulada “Reactor de atmósfera y temperatura controlada para la producción de carbones vítreos” Este artículo describe el diseño de “un reactor de atmósfera controlada para la producción de carbón vítreo en un laboratorio de la Escuela Politécnica de Antioquia”. La investigación en la producción de materiales avanzados requiere maquinaria especializada para controlar “las condiciones de temperatura y atmósfera durante los procesos de producción”. Sin embargo, la falta de este tipo de maquinaria ha sido un obstáculo para la aplicación práctica de los resultados teóricos.

En la búsqueda de la formación en los laboratorios de E.I.A., se necesitan máquinas capaces de desarrollar diferentes procesos y desarrollar competencias acordadas para diferentes áreas de enfoque en diferentes disciplinas. En este caso, el objetivo era proporcionar una máquina capaz de desarrollar procesos térmicos controlando las etapas de calentamiento y garantizando la precisión de las mediciones acordadas para apoyar el desarrollo del sector de materiales en la búsqueda de investigaciones experimentales que conduzcan a la producción de materiales avanzados dentro de las instalaciones del Instituto.

Por estas razones, los laboratorios de la EIA desarrollaron el concepto y el diseño detallado de “un reactor de atmósfera

controlada para la producción de carbono vítreo” (véase la Figura 15). La necesidad acordada de este reactor se centra en la capacidad de variar los parámetros de funcionamiento para desarrollar procesos distintos de la producción de carbono vítreo. A partir de los requisitos, se están desarrollando soluciones mecánicas, estructurales, electrónicas y de software para el funcionamiento conjunto del reactor con temperatura y gas inerte.

### Figura 15

*Planta de temperatura*



Fuente: Diez, 2012

Martínez de Zuñiga (2011), en su trabajo de tesis titulada “Evaluación de la calidad de Kiwis almacenados en refrigeración envasados en distintas atmósferas modificadas y el uso de 1 – MCP”, este estudio evaluó el efecto de diferentes “atmósferas modificadas y el uso de 1-MCP en la calidad de kiwis refrigerados almacenados y empacados en envases de polietileno de alta densidad (HDPE)”. Los kiwis se almacenaron durante hasta 7 meses a 0°C y alta humedad relativa (95%) sin exposición al etileno. “Se midieron diversos parámetros fisicoquímicos y se evaluó la calidad sensorial de la fruta al final del período de almacenamiento”. Los resultados mostraron que algunas atmósferas modificadas afectaron negativamente la producción y calidad del etileno y provocaron el desarrollo

de enfermedades en la fruta. Los envases PAD con 1-MCP, por otro lado, “lograron suprimir la producción de etileno, mejorar la calidad fisicoquímica y organoléptica y prolongar la vida útil de la fruta después del almacenamiento”. (ver figura 16)

### **Figura 16**

*Incubación de los frutos y extracción de muestras*



Fuente: Universidad Nacional de Mar del Plata, 2011

Pérez et al. (2011), en la publicación titulada “Almacenamiento frigorífico de naranjas en atmosfera controlada”. Esta publicación trata del mantenimiento en diversas condiciones en atmósfera controlada. Se almacenaron durante 154 días en tres cámaras frigoríficas en cajas industriales como se muestra en la Figura 17. En los que se evalúan los diferentes cambios y pérdidas de peso. Se evaluaron “los cambios en el envejecimiento, el ablandamiento y el daño por frío, que variaron en función de las condiciones de las cámaras: el daño por frío y el índice de descomposición disminuyen a altas concentraciones de CO<sub>2</sub>”.

## Figura 17

*Cajas utilizadas para el almacenamiento de las naranjas con celdas,  
Córdoba - España.*



Fuente: Pérez et al. (2011)

Montoya (2005), en la publicación titulada. “Tecnología de atmósferas controladas para frutas y hortalizas, caso de estudio: Modelo Aguacate (Persea Americana) Variedad Hass”, Según la FAO (2000), “las pérdidas de frutas y verduras tras la cosecha alcanzan entre el 30% y el 40% en todo el mundo, siendo más elevadas en países en desarrollo. Para reducir estas pérdidas, es importante mejorar las técnicas de almacenamiento y conservación”. El almacenamiento adecuado de distintas frutas y verduras se basa en condiciones ideales (temperatura, humedad relativa y aire ambiente) adaptadas a las características específicas de cada producto.

Bajar la temperatura de los productos ralentiza el proceso metabólico, pero si va acompañado de un cambio en la atmósfera ambiente, el proceso puede ralentizarse aún más.

## 2.2 Bases teóricas

### 2.2.1. Cámaras de atmósferas controladas

De acuerdo con Sierra (2019), “las cámaras de atmósfera controlada para la conservación de frutas son un mecanismo utilizado en una gran variedad de alimentos”, sobre todo en frutas de clima no controlado, para controlar y reducir el metabolismo de los alimentos tras su recolección. Esto prolonga la vida útil del producto y ralentiza el proceso de maduración y envejecimiento, al tiempo que mantiene la calidad y disponibilidad del producto. Esto es posible gracias al uso de cámaras de atmósfera controlada, que son dispositivos que intervienen alterando la composición de los gases atmosféricos en un espacio cerrado en el que se aplica un control regulador de las variables físicas ambientales.

Esta técnica está asociada a las bajas temperaturas; hace hincapié en el efecto del enfriamiento sobre la actividad celular del producto, evitando ciertos problemas fisiológicos. El control de los parámetros de cuidado del producto es una tarea bastante difícil, ya que hay que tener en cuenta diferentes rangos de temperatura, humedad y concentración de componentes del aire. El envejecimiento se refiere a cambios en el metabolismo, la producción de etileno y otras sustancias con el paso del tiempo. Estas sustancias, como el ácido abscísico y los jasmonatos, son quienes dan lugar a los cambios en la estructura celular del producto. Por otra parte, hormonas como las giberelinas, las citoquininas y los brasinoesteroides están asociadas a la ralentización del envejecimiento de los productos. Otro factor importante durante el proceso de maduración es el etileno, un compuesto químico responsable del proceso de estrés y maduración de la planta y fruta respectivamente. Los niveles de este compuesto varían durante el proceso de maduración a medida que cambia la tasa de respiración de la fruta (Sierra, 2019).

Además, existe otro parámetro, “la sensibilidad a las concentraciones de oxígeno y dióxido de carbono en función de la temperatura de almacenamiento”. Cuando aumenta la

temperatura o la duración del almacenamiento, también aumenta el límite de tolerancia al oxígeno. La tolerancia de los productos a niveles elevados de dióxido de carbono disminuye a medida que disminuyen los niveles de oxígeno. Según algunos estudios, “la pérdida de peso de la fruta durante el proceso de maduración no está relacionada de forma significativa con la temperatura y el tiempo de almacenamiento”, sino con la composición atmosférica a la que está expuesta la fruta. Durante el desarrollo de la industria alimentaria, varios de estos métodos se han aplicado a la conservación de alimentos (Sierra, 2019).

### 2.2.2. Maduración de frutos y etileno

La maduración es el proceso por el cual las frutas adquieren las características deseables de sabor, calidad, color, palatabilidad y textura. Esto está relacionado con el cambio en la composición, es decir, la conversión del almidón en azúcar. Un factor importante en la maduración climatérica es la hormona vegetal natural etileno, que es producida por la fruta y liberada al aire circundante. El etileno acelera los procesos de maduración y senescencia, haciendo que las frutas climatéricas reaccionen fuertemente a él. El etileno es una hormona vegetal que controla o influye en muchos aspectos del crecimiento y desarrollo de las plantas, incluyendo la senescencia, la pérdida de órganos y la maduración de la fruta, que son importantes para la agricultura. Por ejemplo, las frutas climatéricas como el tomate, el plátano y la manzana necesitan un aumento en la producción de etileno para madurar (Mazonde et al., 2017).

El etileno también se produce a partir de la quema de compuestos orgánicos, tanto en procesos naturales como a resultado de actividades humanas. La atmósfera contiene muy poca cantidad de etileno. La cantidad óptima de etileno en un almacenamiento dependerá del tipo de fruta climatérica. En general, a medida que las frutas maduran, se vuelven más dulces, menos verdes y más suaves. Aunque la acidez y el dulzor aumentan durante la maduración, la fruta todavía se siente más dulce. Las frutas climatéricas producen grandes cantidades de etileno, aunque las concentraciones internas varían significativamente entre los tipos

de frutas. Un fuerte aumento en la concentración interna de etileno precede o coincide con un aumento en la tasa de respiración de la mayoría de las frutas climatéricas. La exposición a pequeñas cantidades de etileno puede hacer que la fruta produzca más etileno y desencadenar cambios bioquímicos y fisiológicos durante la maduración. Este proceso se conoce como auto catalítico, es decir, la exposición a una pequeña cantidad de etileno hace que la fruta produzca más etileno hasta alcanzar una concentración máxima. La exposición de frutas climatéricas inmaduras a etileno puede iniciar este proceso auto catalítico (Mazonde et al., 2017).

### 2.2.3. Maduración y respiración

La maduración es el proceso por el cual la fruta pasa de la madurez fisiológica a la senescencia (envejecimiento y muerte de los tejidos de la planta). Es una etapa de desarrollo que facilita la reproducción preparando el órgano portador de semillas para ser desprendido de la planta. Durante la maduración, se producen importantes cambios bioquímicos y fisiológicos, como el cambio en el color de la piel, el ablandamiento interno de la carne, el desarrollo de aromas y el aumento de la dulzura. La maduración generalmente comienza después de que la fruta ha alcanzado su tamaño máximo y está fisiológicamente madura. En este estado, la fruta ha acumulado una serie de moléculas complejas como carbohidratos, proteínas, lípidos y ácidos orgánicos. Una vez que se separa (se cosecha) de la planta, la fruta sigue siendo un organismo vivo, pero ya no puede obtener agua ni nutrientes de la planta para satisfacer sus necesidades energéticas y completar los procesos de maduración. La fruta sigue siendo metabólicamente activa y su respiración ahora depende de estas moléculas complejas acumuladas. La respiración es un proceso de descomposición oxidativa de moléculas complejas en moléculas más simples que produce energía, agua, dióxido de carbono y moléculas más simples necesarias para otras reacciones bioquímicas celulares requeridos para la maduración. La tasa de respiración por unidad de peso de la fruta es, en general, más alta en frutas inmaduras y disminuye con la edad. Por lo tanto, la tasa de respiración de la fruta es un indicador del nivel de actividad

metabólica general, la progresión de la maduración y la vida útil de almacenamiento de la fruta. Una tasa de respiración baja significa que las reservas de energía tardarán más en consumirse y la fruta se puede almacenar durante más tiempo (Mazonde et al., 2017).

#### 2.2.4. Separador de aire de adsorción por oscilación de presión

El sistema PSA separa el aire en nitrógeno y oxígeno utilizando un lecho de adsorción compuesto por un tamiz molecular de carbono (CMS) que selectivamente adsorbe el oxígeno y permite que el nitrógeno pase a través de él. El sistema está compuesto por un compresor de aire, un secador de aire, un depósito de aire, dos lechos de adsorción, y un receptor de nitrógeno. Los lechos de adsorción se presurizan y despresurizan alternativamente para generar nitrógeno y desechar oxígeno, respectivamente, dando lugar al término PSA (presión-swing adsorción). El proceso proporciona un flujo continuo de nitrógeno que puede contener trazas o varios porcentajes de oxígeno, dependiendo de la presión del aire de entrada y el flujo de salida de nitrógeno. La humedad del aire debe eliminarse antes de llegar al CMS, ya que éste adsorbe y arrastra agua, reduciendo su capacidad de adsorción de oxígeno. La humedad se elimina mediante un secador de aire refrigerado. Además, el proceso PSA también elimina el etileno y el dióxido de carbono de la corriente de gas, lo que permite que el sistema se utilice como depurador para el almacenamiento de ciertos gases. Se necesita un compresor de aire de calidad industrial del tipo de tornillo con una potencia de entre 15 y 40 hp para proporcionar el volumen de aire a las presiones requeridas (Dilley, 2006).

#### 2.2.5. Separador de aire de membrana de fibra hueca

La separación del aire en nitrógeno y oxígeno se realiza mediante membranas y se basa en la permeabilidad selectiva de cada gas. La mayor parte de la experiencia en esta área se ha adquirido con el sistema Prism Alpha de Permea, Inc. El nitrógeno es

relativamente mucho más lento que el oxígeno, el dióxido de carbono y el vapor de agua en términos de permeabilidad a través de las membranas. El aire se presuriza y se introduce en fibras huecas hechas de material de membrana que recorren la longitud de los tubos cilíndricos. Los gases se separan a medida que atraviesan la longitud de la fibra, con el nitrógeno enriqueciéndose en la corriente de salida y el oxígeno enriqueciéndose en los gases residuales que permean la pared de la fibra.

La fuerza motriz para la separación de gases es el gradiente de presión parcial entre el interior y el exterior de la fibra hueca. Aumentar la temperatura y la presión aumenta la velocidad de permeación y, por lo tanto, la velocidad y pureza del nitrógeno entregado. El sistema está compuesto por un compresor de aire, un filtro, un calentador, un módulo de membrana y un tanque receptor. La salida de flujo y pureza del nitrógeno se pueden ajustar mediante una válvula de restricción en la salida de nitrógeno. Al igual que con el sistema PSA, se utiliza un compresor de aire de calidad industrial del tipo tornillo para proporcionar aire a las presiones y volúmenes requeridos. El dióxido de carbono y el etileno también se separan del nitrógeno mediante el separador de aire de membrana de fibra hueca, permitiendo así que el sistema se utilice para eliminar estos gases del entorno de almacenamiento mediante la recirculación de la atmósfera de almacenamiento a través del sistema Prism Alpha. En este modo de operación, el aire fresco de reposición se mezcla con la atmósfera proveniente de la habitación en la entrada del compresor, con medios para asegurar que se mantiene el nivel adecuado de nitrógeno en la habitación (Dilley, 2006).

#### 2.2.6. Empobrecimiento de oxígeno: LO, ULO y HLO

Las atmósferas bajas en oxígeno LO, ultra bajas en oxígeno ULO y ultra bajas en oxígeno HLO son métodos que consisten en reducir el porcentaje de oxígeno en la atmósfera controlada, ya que en este ambiente se reduce la respiración y el calor generado por la fruta y al mismo tiempo se controla la producción de etileno. También

“ralentiza el metabolismo de azúcares, proteínas, lípidos, ácidos, pectinas y vitaminas, impidiendo así la formación de ciertos tipos de hongos”. Una vez expuesta a estas condiciones, la fruta permanece latente, pero tiene potencial de reactivación vegetativa cuando se expone a la atmósfera exterior. Cabe señalar que la técnica HLO se asocia a un alto riesgo de hipoxia embrionaria. Algunas frutas, como la papaya, “pueden tolerar concentraciones de oxígeno tan bajas como el 0,2%”. El intervalo medio de concentración de oxígeno para la mayoría de las frutas oscila entre el 1% y el 5% debido al riesgo de respiración anaeróbica, niveles elevados de etanol y acetaldehído que provocan sabores y aromas indeseables (Sierra, 2019).

#### 2.2.7. Enriquecimiento de CO<sub>2</sub>

Esta técnica consiste en reducir drásticamente la actividad respiratoria de la fruta inyectando dióxido de carbono en la atmósfera controlada, que desplaza el oxígeno disponible. Esto garantiza una actividad respiratoria significativamente menor sin afectar a la coloración y manteniendo la estabilidad del alimento. Este efecto sobre la respiración de la fruta “es mucho más importante que el causado por las bajas temperaturas”. “Las concentraciones nominales de dióxido de carbono en estas cámaras oscilan entre el 8 % y el 20 % (dentro de este intervalo máximo, el crecimiento de hongos se reduce significativamente)”, el menor contenido de dióxido de carbono favorece la conservación del peso del producto y el alto contenido de dióxido de carbono reduce el envejecimiento de la fruta debido a que el dióxido de carbono actúa como un inhibidor compatible del etileno. Las altas concentraciones de CO<sub>2</sub> causan daños fisiológicos y favorecen la infección de los tejidos y el desarrollo de manchas negras, provocan una pérdida significativa de azúcares al ralentizar el proceso de conversión de la poli sacarosa, lo que se traduce en una pérdida de olor y un aumento de la acidez. Algunas frutas pueden tolerar concentraciones de dióxido de carbono cercanas al 30% (Sierra, 2019).

### 2.2.8. Procesos de enfriamiento

La humedad juega un papel muy relevante en la conservación de los alimentos frescos, ya que con el tiempo empiezan a perder agua y, por tanto, peso. Los estudios han demostrado que una humedad relativa de entre el 80 y el 95 % para evitar el crecimiento bacteriano, combinada con una atmósfera con un alto contenido de dióxido de carbono (12,6 %), provoca una pérdida de peso de alrededor del 23 % cuando se almacena durante más de 30 días. Las pérdidas de peso superiores al 5 % provocan un deterioro de la calidad del producto. Las técnicas de control de gases se complementan con bajas temperaturas y alta humedad. Esto prolonga la vida útil de la fruta y evita la propagación de bacterias y hongos, que son las principales causas del deterioro de los alimentos. Al mismo tiempo, ralentizan los procesos metabólicos que afectan al envejecimiento de los tejidos del producto. La fruta expuesta a técnicas de control de gases en combinación con técnicas de refrigeración sufre muchos menos daños que la fruta almacenada en condiciones ambientales (Sierra, 2019).

Para manipular la atmósfera normal y mantenerla controlada, es necesario tres tipos de gases como el oxígeno, el dióxido de carbono y el nitrógeno, estos se deben mezclar siguiendo los parámetros necesarios para lograr lo deseado.

**Oxígeno.** “Un menor contenido de oxígeno en el aire provoca una disminución en la tasa respiratoria y una menor producción de etileno en las frutas y verduras” (Graell y Ortiz, 2003).

**Nitrógeno.** El uso de gases inerte como el nitrógeno es para reducir “la cantidad de oxígeno en el aire y así disminuir el crecimiento de microorganismos aeróbicos que causan la descomposición de los alimentos, así como para protegerlos de la oxidación”. Además, se utiliza para regular la composición del aire dentro de una cámara de almacenamiento y lograr una concentración adecuada. (Parry, 1993)

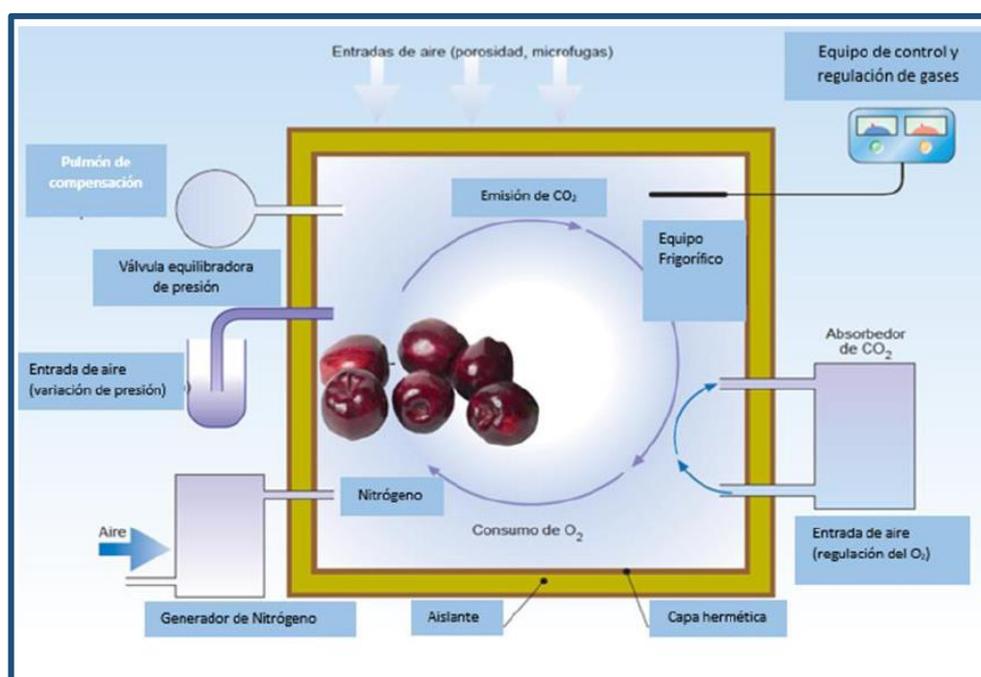
**Dióxido de carbono.** “Incrementar el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en el aire disminuye la tasa respiratoria y inhibe la acción del etileno, lo que reduce la actividad metabólica en los tejidos vegetales y provoca un estado de letargo”. También inhibe la actividad de los microorganismos (Yahia, 1995b).

### 2.2.9. Construcción y equipos necesarios para una cámara de AC

Para implantar con éxito una atmósfera controlada se necesitan cámaras herméticas y equipos con las características (Figura 18), que deben garantizar el cumplimiento de tres aspectos clave:

**Figura 18**

*Esquema de una cámara de atmósfera controlada.*



Fuente: Graell y Ortíz, 2003

Requisitos de la cámara CA. Si se va a construir una cámara de AC, el equipo debe diseñarse cuidadosamente. Hay que tener en cuenta varios factores:

- La ubicación del lugar, considerando la cercanía a carreteras, drenaje y posibles expansiones futuras.
- Aislamiento adecuado de paredes, techos (y posiblemente suelos) para evitar el calentamiento del espacio y la condensación.
- La posibilidad de instalar barreras de vapor en paredes y techos para prevenir la entrada de humedad al aislamiento y a las cavidades de las paredes.
- “Un sistema de refrigeración suficientemente potente para enfriar rápidamente la fruta y mantener altos niveles de humedad relativa en las zonas de almacenamiento”.
- Un sistema de control para monitorear y mantener la temperatura y la concentración de gases deseados en la sala.
- Una buena disposición de la estructura de almacenamiento para permitir que el personal mueva los productos rápidamente desde y hacia la sala de atmósfera controlada.

#### **Hermeticidad de las cámaras frigoríficas.**

Es importante que las cámaras frigoríficas estén bien selladas para evitar la infiltración de aire. Los materiales utilizados para crear una capa hermética alrededor del perímetro de la cámara incluyen plástico, poliéster, poliuretano, revestimiento metálico y paneles sándwich. Es necesario realizar pruebas de estanqueidad de forma regular para detectar y corregir cualquier problema. También se pueden instalar pulmones compensatorios y válvulas equilibradoras de presión en las puertas de la cámara para evitar cambios significativos en la atmósfera interior debido a la entrada de aire exterior. (Graell et al., 1998)

**Barridos de la atmósfera,** La eliminación de oxígeno de la cámara mediante el uso de nitrógeno puede permitir un inicio rápido y bajos niveles de O<sub>2</sub>. El nitrógeno se puede suministrar como gas o líquido comprimido o mediante barredores de aire. “Una de las principales ventajas de estos sistemas es la capacidad de eliminar rápidamente el oxígeno de la cámara, también eliminando otros componentes volátiles nocivos”. Estos sistemas pueden automatizarse para encenderse en caso de

cambios en la concentración de gases deseada. (Graell y Ortíz, 2003; Graell et al., 1998)

**El análisis y el control de la composición de los gases** son esenciales para prevenir los daños debidos a la hipoxia, especialmente en entornos con déficit de oxígeno.

#### **Sistemas de control de gases producidos.**

Deben eliminarse las cantidades excesivas de CO<sub>2</sub> y etileno en el interior de la cámara, ya que estos gases pueden causar graves daños a los productos almacenados, especialmente si son muy sensibles a estos gases.

- **Controladores de CO<sub>2</sub>:** Para mantener bajos los niveles de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en una cámara de almacenamiento, se pueden utilizar sistemas de depuración que utilizan compuestos o materiales como cal hidratada (hidróxido de calcio). Esta cal se puede colocar directamente en el recipiente para reducir aún más la concentración de CO<sub>2</sub>. También se pueden usar bolsas con cal que se colocan en la cámara o en un lado de ella y se conectan a la cámara mediante tuberías. El aire del interior de la cámara es forzado a pasar a través de la tubería y la cal, que absorbe el CO<sub>2</sub> y reduce su concentración cuando este gas está presente en altas cantidades. (Cerón y Rodríguez, 2007)
- **Monitoreo de concentración de gases:** Es fundamental contar con equipos de monitoreo de concentración de gases para asegurar que el producto se almacena con la cantidad adecuada de gas. Es importante que la medición y control de la concentración de gas sea precisa. Se ha demostrado que el oxígeno es el gas más importante para la conservación de los alimentos en atmósfera controlada, por lo que es esencial conocer su concentración en el producto.

## 2.2.10. Sensores de temperatura.

### a) **Temperatura**

La temperatura es “una medida de calor en un gas, líquido o sólido. Existen cuatro escalas comúnmente utilizadas para medir la temperatura: la escala de Celsius, la escala de Fahrenheit, la escala de Kelvin y la escala de Rankine” (Instrumentación Dinámica, 2013)

### b) **Escala Celsius**

La escala de Celsius fue inventada en 1742 por Andrew Kelsey. “Esta escala divide la diferencia entre los puntos de congelación y ebullición del agua en 100 partes iguales. A veces, también se le llama escala Celsius. Las temperaturas en esta escalase miden en grados Celsius (°C)” (Instrumentación Dinámica, 2013).

### c) **Escala Fahrenheit**

La escala de Fahrenheit fue introducida por el físico Gabriel Daniel Fahrenheit en 1724. “Aunque en la actualidad se utiliza con mayor frecuencia la escala Celsius en muchos países. Las temperaturas en esta escala se miden en grados Fahrenheit (°F)” (Instrumentación Dinámica, 2013)

### d) **Escala Kelvin**

Fue propuesta por el físico Thompson Kelvin en 1848. “Esta escala amplía la escala Celsius hasta el cero absoluto. Las temperaturas en esta escala se miden en Kelvin” (K).

### e) **La escala Rankine.**

La escala Rankine fue propuesta en 1859 por MacQuorn. “La escala Rankine se refiere a grados Fahrenheit, por lo que el cero absoluto se expresa en esta escala en grados Fahrenheit (-459,67 °F). Para obtener otras temperaturas en esta escala, se suma 459,67 al valor de la temperatura en grados Fahrenheit (°R = °F + 459,67)”.

Para la conversión de temperaturas entre las escalas de Celsius, “Fahrenheit, Kelvin y Rankine se detallan las fórmulas en la siguiente Tabla 11”:

**Tabla 11**

*Tabla de conversión de temperaturas*

	Kelvin	Grado Celsius	Grado Fahrenheit	Rankine
Kelvin	$K = K$	$K = C + 273,15$	$K = (F + 459,67) \frac{5}{9}$	$K = Ra \frac{5}{9}$
Grado Celsius	$C = K - 273,15$	$C = C$	$C = (F - 32) \frac{5}{9}$	$C = (Ra - 491,67) \frac{5}{9}$
Grado Fahrenheit	$F = K \frac{9}{5} - 459,67$	$F = C \frac{9}{5} + 32$	$F = F$	$F = Ra - 459,67$
Rankine	$Ra = K \frac{9}{5}$	$Ra = (C + 273,15) \frac{9}{5}$	$Ra = F + 459,67$	$Ra = Ra$

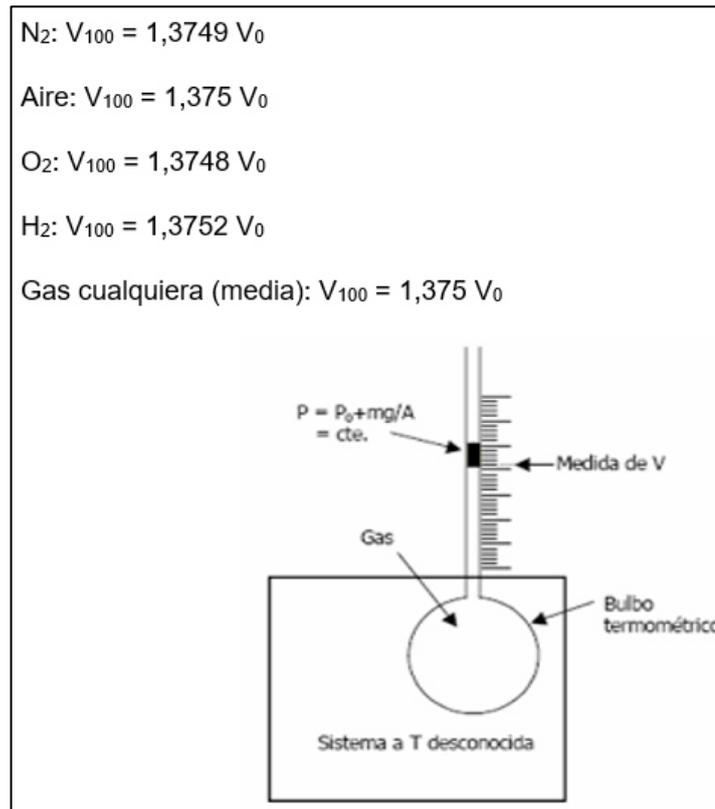
Fuente: Instrumentación Dinámica (2013)

**f) Escala de temperaturas del gas ideal**

Para poder medir la temperatura de un sistema de manera precisa, “es necesario establecer una escala de temperaturas. La escala Celsius asigna valores numéricos a dos puntos fijos (punto de fusión y punto de ebullición del agua pura a 1 atm) de manera arbitraria”. Una forma más precisa de medir la temperatura es utilizando un termómetro de gas a presión constante. Gay-Lussac midió el volumen del gas cuando el sistema estudiado fundía hielo (0°C) y cuando hervía agua (100°C) y encontró que la relación entre los dos volúmenes era constante, independientemente de la cantidad de gas utilizada en el termómetro:

## Figura 19

### Termómetro de gas a presión constante



Fuente: Instrumentación Dinámica (2013)

#### g) Oxígeno (O)

El oxígeno “es un elemento químico con número atómico 8 y símbolo O. Su forma más común es el gas O<sub>2</sub>, que es incoloro, inodoro e insípido y compone aproximadamente el 21% de la atmósfera terrestre”. Es esencial para la química orgánica y “para la respiración celular en organismos aerobios”. El oxígeno también se combina con dos átomos de hidrógeno para formar agua. En condiciones normales de temperatura y presión, el oxígeno tiene la forma de un gas y forma moléculas diatómicas (O<sub>2</sub>) que, aunque inestables, “se producen durante la fotosíntesis en plantas y luego son utilizadas por animales en la respiración. El oxígeno inhalado por los organismos aeróbicos y liberado por las plantas a través de la fotosíntesis es importante en la conversión de nutrientes en energía (ATP)” (Química, 2020).

Las propiedades físicas de Oxígeno son:

- “Estado ordinario: Gas(paramagnético)”
- “Densidad: 1,429kg/m<sup>3</sup>”
- “Punto de fusión: 50,35K(-223°C)”
- “Punto de ebullición: 90,18K(-183°C)”
- “Entalpía de vaporización: 6,8061kJ/mol”
- “Entalpía de fusión: 0,4384kJ/mol”
- “Volumen molar: 17,36×10<sup>-3</sup>m<sup>3</sup>/mol”

#### **h) Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)**

El dióxido de carbono es “un gas que no tiene color ni olor y que no se puede quemar. Se encuentra en pequeñas cantidades en el aire que respiramos y se produce cuando se queman cosas que contienen carbono, durante la respiración y la fermentación”. Se puede disolver en agua a una presión constante y es una molécula formada por “un átomo de carbono y dos átomos de oxígeno”, adoptando la forma:



Aunque es un gas a temperaturas y condiciones normales, puede solidificarse a temperaturas inferiores a -79 °C y “se convierte en líquido cuando se disuelve en agua”. La sustancia se descompone para formar vapores tóxicos de monóxido de carbono cuando se calienta por encima de 2000 °C y “reacciona violentamente con bases fuertes y metales alcalinos”.

Las propiedades físicas son:

- “Fórmula química:CO<sub>2</sub>”
- “Masa molecular:44,0g/mol”
- “Punto de sublimación:-79°C”
- “Punto de fusión:-56,6a5,2atm”
- “Solubilidad en agua(ml/100mla20°C):88”
- “Presión de vapor(Kpa a20°C):5720”
- “Densidad relativa del gas(aire=1g/ml):1,5g/ml”

## i) Nitrógeno (N<sub>2</sub>)

El nitrógeno “es un gas inerte que no posee color, olor ni sabor, y no metálico que constituye aproximadamente las cuatro quintas partes del aire que compone la atmósfera”, aunque no participa en la combustión ni en la respiración.

Una de sus principales características es su poca solubilidad en el agua y su no toxicidad, sin embargo, puede provocar asfixia debido a que desplaza el aire y el oxígeno. Al combinar este elemento con el hidrógeno puede formar compuestos como “NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>H<sub>4</sub> y N<sub>3</sub>H, también conocida como azida de hidrógeno o ácido hidrazoico”.

Las propiedades físicas del nitrógeno son:

- “Fórmula química: N<sub>2</sub>”
- “Masa molecular: 28,013g/mol”
- Temperatura ebullición (1atm): -195,8°C
- Temperatura crítica: -146,9°C
- Presión crítica: 33,9bar
- Densidad gas (20°C, 1atm): 1,161g/l
- Densidad líquida (p.e., 1atm): 0,808g/l
- Solubilidad en agua (0°C, 1atm.): 2,33cm<sup>3</sup>/100cm<sup>3</sup>H<sub>2</sub>O
- Calor latente de vaporización: 47,44cal/g

## 2.3 Modelamiento

### 2.3.1. Sistemas de primer orden

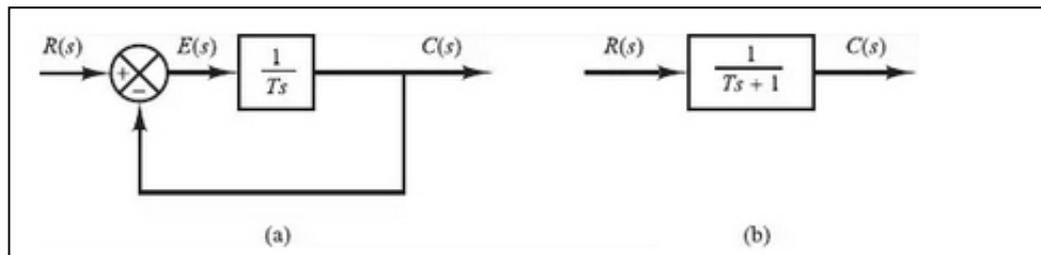
En la Figura. 20(a), se considera el sistema de primer orden. Este sistema se representa a nivel físico mediante un circuito RC. La Figura 20(b), detalla el diagrama de bloques simplificado.

La relación entre entrada-salida se muestra:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{(Ts + 1)} \quad (2.3.1.1)$$

**Figura 20**

*Diagrama de bloques*



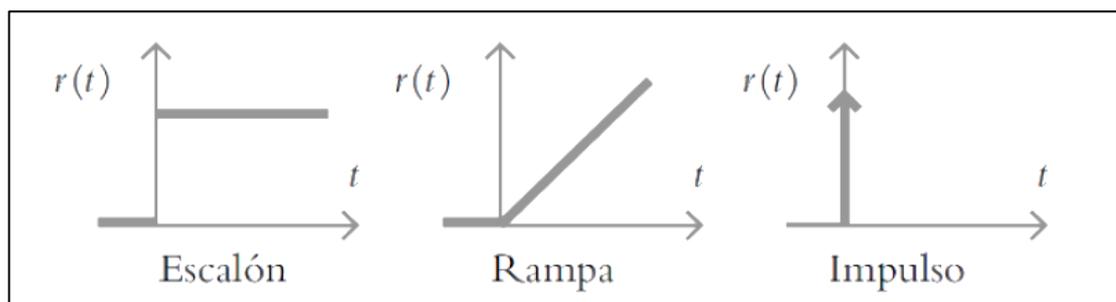
*Nota.* (a). “Diagrama de bloques de un sistema de primer orden”,  
 (b) “Diagrama de bloques simplificado”.

Fuente: Ogata (2010)

Tal como se muestra en la Figura. 21, “se analiza las respuestas que brinda el sistema a entradas como la función escalón unitario, rampa e impulso unitario, suponiendo que, al inicio, las condiciones sean cero”.

**Figura 21**

*Tipo de entradas para sistema de control*



Fuente: (Ogata, 2010)

**A) Respuesta escalón unitario de sistemas de primer orden**

Como la transformada es  $R(s)=1/s$ , sustituyendo en la ecuación (2.3.1.1), se obtiene:

$$C(s) = \left( \frac{1}{Ts + 1} \right) \frac{1}{s} \quad (2.3.1.2)$$

Si desarrollamos  $C(s)$  por expansión de fracciones parciales se obtiene:

$$C(s) = \frac{1}{s} - \frac{T}{Ts + 1} = \frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{1}{T}} \quad (2.3.1.3)$$

Tomando la transformada inversa de Laplace se obtiene:

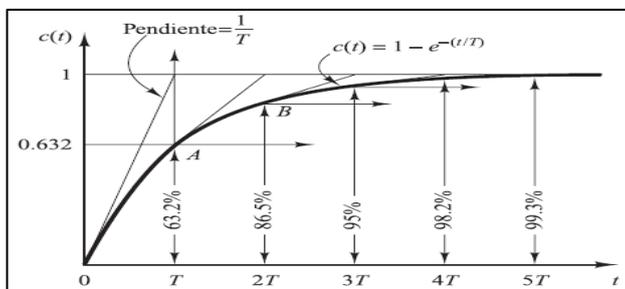
$$c(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T}}, \quad \text{para } t \geq 0 \quad (2.3.1.4)$$

La ecuación (2.3.1.4) propone que la salida  $c(t)$  es inicialmente cero y en el estado estable alcanza el valor final de uno. Para  $t=T$ , el valor de  $c(t)$  es igual a 0.632 lo que significa que la respuesta  $c(t)$  alcanzó el 63.2% de su valor final. Es decir:

$$c(t) = 1 - e^{-1} = 0.632 \quad (2.3.1.5)$$

**Figura 22**

*Curva de respuesta exponencial.*



Fuente: Ogata (2010).

En la Figura. 22, se observa que según la constante de tiempo  $T$  sea más pequeña, la respuesta del sistema será más rápida.

La figura 22 muestra que a medida que transcurre el tiempo, el sistema experimenta un cambio exponencial y alcanza un valor final. En particular, después de 3, 4 y 5 constantes de tiempo T, la respuesta alcanza el 95%, 98,2% y 99,3% de su valor final, respectivamente. Matemáticamente, el sistema alcanzaría un estado estacionario después de un tiempo infinito, pero en la práctica, se puede considerar que el tiempo de respuesta se alcanza cuando la curva de tiempo de respuesta alcanza el 2% de su valor final, lo que equivale a aproximadamente 4 constantes de tiempo.

### **B) Respuesta de rampa unitaria en sistemas de primer orden**

Como la transformada de Laplace de la función rampa unitaria es  $R(s)=1/s^2$ , se obtiene: (Figura 20(a))

$$C(s) = \left( \frac{1}{Ts + 1} \right) \frac{1}{s^2} \quad (2.3.1.6)$$

Desarrollando  $C(s)$  se obtiene:

$$C(s) = \frac{1}{s^2} - \frac{T}{s} + \frac{T^2}{Ts + 1} \quad (2.3.1.7)$$

Tomando la transformada inversa de Laplace se obtiene:

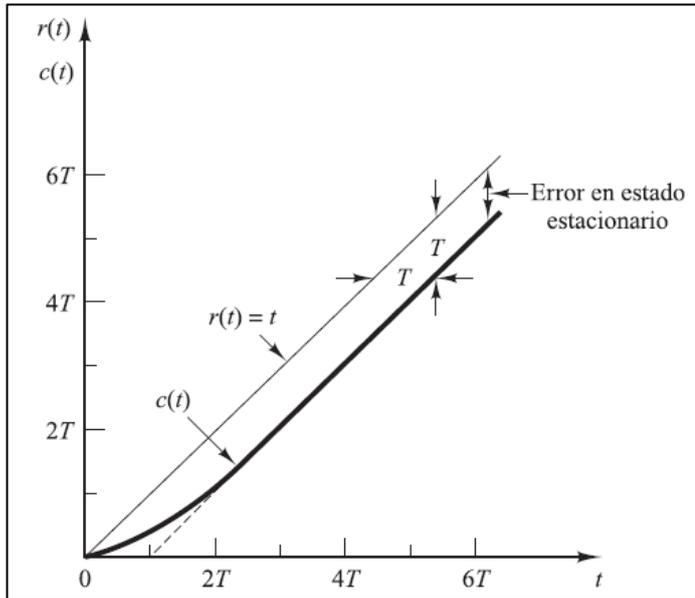
$$c(t) = t - T + Te^{-\frac{t}{T}}, \quad \text{para } t \geq 0 \quad (2.3.1.8)$$

De este modo, la señal de error  $e(t)$  es

$$e(t) = r(t) - c(t) = T(1 - e^{-t/T}) \quad (2.3.1.9)$$

**Figura 23**

*Respuesta a rampa unitaria del sistema mostrado en la Figura 20(a).*



Fuente: Ogata (2010).

Como se observa en la Figura. 23 “a medida que  $t$  se direcciona al infinito,  $e^{-t/T}$  va en dirección a cero, por lo tanto, la señalización que marca error  $e(t)$  se aproxima a  $T$ . Asimismo, se observa que con forme la constante tiempo  $T$ , se hace más pequeña, menor es el nivel de error en estado estacionario luego de la entrada rampa”.

### **C) Respuesta de impulso unitario en sistemas de primer orden**

De la Figura. 20(a), se obtiene la salida del sistema. “Como la transformada de Laplace de la función impulso unitario es  $R(s)=1$ ”:

$$C(s) = \left( \frac{1}{Ts + 1} \right) \quad (2.3.1.10)$$

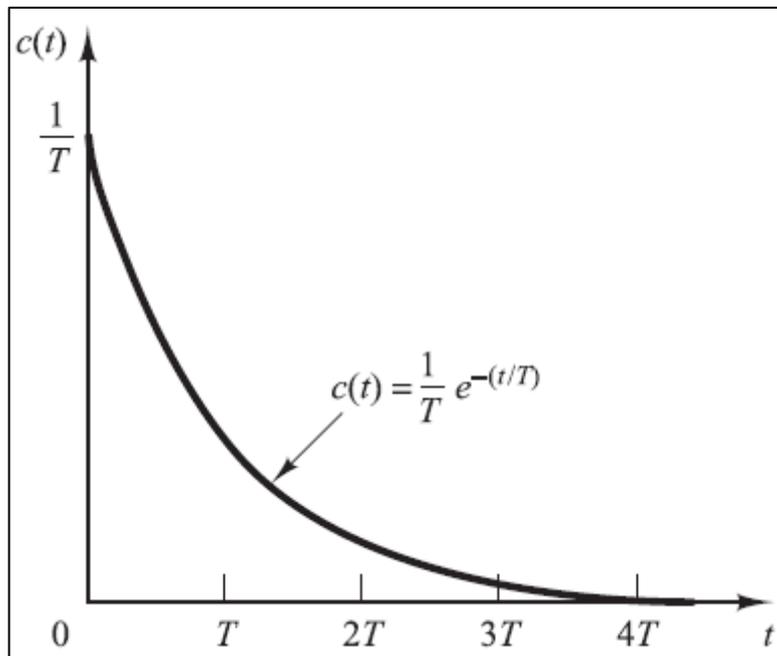
Tomando la transformada inversa de Laplace:

$$c(t) = \frac{1}{T} e^{-\frac{t}{T}}, \quad \text{para } t \geq 0 \quad (2.3.1.11)$$

Mediante la ecuación (2.3.1.11) obtenemos la siguiente curva de respuesta:

**Figura 24**

“Respuesta a impulso unitario del sistema mostrado en la Figura 20(a)”.



Fuente: Ogata (2010).

### 2.3.2. Sistemas de segundo orden

Se considera como ejemplo un servomotor modelado, “para el sistema de segundo orden, por la siguiente ecuación”:

$$J\ddot{c} + B\dot{c} = T \quad (2.3.2.1)$$

Aplicando “transformada de Laplace a la Ecuación (2.3.2.1) y asumiendo condiciones iniciales igual a 0, obtenemos”:

$$Js^2C(s) + BsC(s) = T(s) \quad (2.3.2.2)$$

Donde:

$J$ : Inercia.

$B$ : Fricción.

$T$ : Es el torque o función forzada de la ecuación diferencial.

Por lo tanto, la función de transferencia entre  $C(s)$  y  $T(s)$  es:

$$\frac{C(s)}{T(s)} = \frac{1}{s(Js + B)} \quad (2.3.2.3)$$

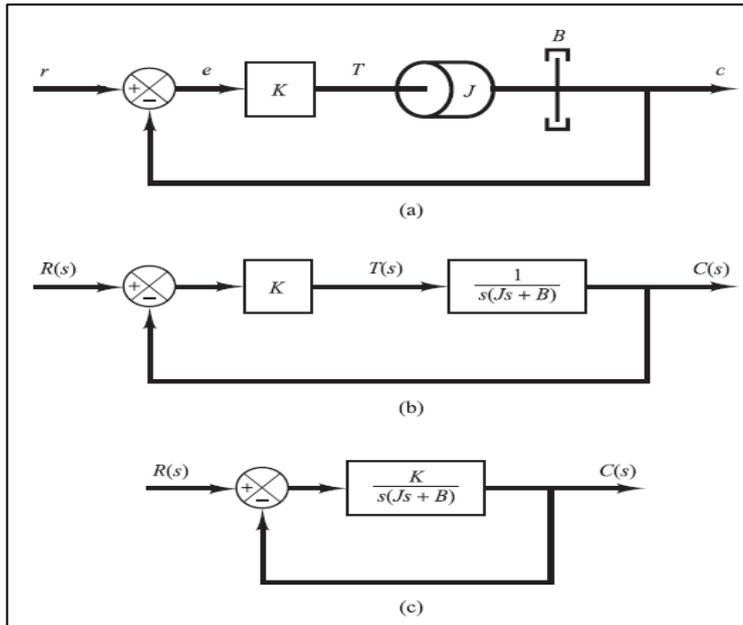
Teniendo en cuenta una ganancia  $K$  en el lazo de transmisión directa, la función de transferencia en lazo cerrado es:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{Js^2 + Bs + K} = \frac{\frac{K}{J}}{s^2 + \left(\frac{B}{J}\right)s + \frac{K}{J}} \quad (2.3.2.4)$$

Se considera sistema de segundo orden, "el sistema en el que la función de transferencia en lazo cerrado posee dos polos".

**Figura 25**

*Sistema de dos polos*



Nota. (a) Servosistema; (b) diagrama de bloques; (c) diagrama de bloques simplificado. Fuente: (Ogata, 2010)

**A) Respuesta del sistema de segundo orden a un escalón unitario**

Para este caso el sistema de lazo cerrado está representado por la siguiente función de transferencia:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{Js^2 + Bs + K} \tag{2.3.2.5}$$

Y se puede representar de la siguiente forma siguiente:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\left(\frac{K}{J}\right)}{\left[ s + \frac{B}{2J} + \sqrt{\left(\frac{B}{2J}\right)^2 - \frac{K}{J}} \right] \left[ s + \frac{B}{2J} - \sqrt{\left(\frac{B}{2J}\right)^2 - \frac{K}{J}} \right]} \tag{2.3.2.6}$$

Por lo tanto se considera que los polos en lazo cerrado son complejos si  $B^2 - 4JK < 0$ , y son reales si  $B^2 - 4JK \geq 0$ . Para el análisis se debe definir lo siguiente:

$$\frac{K}{J} = \omega_n^2, \quad \frac{B}{J} = 2\zeta\omega_n = 2\eta \quad (2.3.2.7)$$

Donde:

$\eta$ : Atenuación.

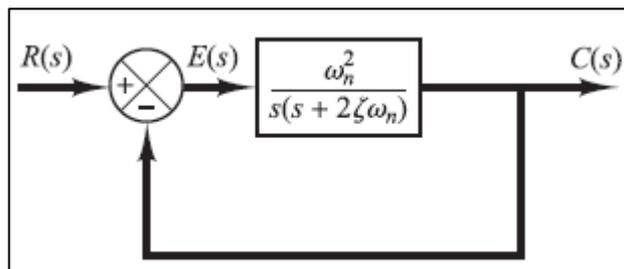
$\omega_n$ : Frecuencia natural no amortiguada.

$\zeta$ : Factor de amortiguamiento relativo del sistema.

En términos de  $\zeta$  y  $\omega_n$ , el sistema de la Figura. 25 se convierte en:

**Figura 26**

*Sistema de segundo orden*



Fuente: Ogata (2010)

Y la función de transferencia en lazo cerrado obtenida mediante la Ecuación (2.3.2.5) se escribe como:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.3.2.8)$$

Se considera una ecuación estándar a esta ecuación del sistema de segundo orden.

Cuando el valor de  $\zeta$  “está comprendido entre 0 y 1, los polos de un sistema en lazo cerrado son complejos conjugados y se encuentran en el semiplano izquierdo del plano  $s$ ”. Esto da lugar a una respuesta transitoria oscilatoria para el sistema subamortiguado. Si  $\zeta$  “tiene un valor

de 0, la respuesta transitoria no se amortigua y si  $\zeta$  es igual a 1, el sistema es críticamente amortiguado. Si  $\zeta$  es mayor a 1, el sistema es sobreamortiguado. La Figura 23 ilustra la respuesta del sistema a una entrada escalón unitario para estos tres casos diferentes”.

**a) En el caso subamortiguado,  $C(s)/R(s)$  se define como:**

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{(s + \zeta\omega_n + j\omega_d)(s + \zeta\omega_n - j\omega_d)} \quad (2.3.2.9)$$

Donde:

$\omega_d$ : Frecuencia natural amortiguada, y además:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$$

Para una entrada escalón unitario se tiene:

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)s} \quad (2.3.2.10)$$

Para poder obtener la transformada inversa de Laplace, vamos a darle forma a la siguiente ecuación:

$$C(s) = \frac{1}{s} - \frac{s + 2\zeta\omega_n}{(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (2.3.2.11)$$

$$C(s) = \frac{1}{s} - \frac{s + \zeta\omega_n}{(s + \zeta\omega_n)^2 + \omega_d^2} - \frac{\zeta\omega_n}{(s + \zeta\omega_n)^2 + \omega_d^2} \quad (2.3.2.12)$$

Aplicando la transformada inversa se obtiene lo siguiente:

$$\mathcal{L}^{-1}[C(s)] = c(t)$$

$$\mathcal{L}^{-1}[C(s)] = 1 - e^{-\zeta\omega_n t} \left( \cos \omega_d t + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \operatorname{sen} \omega_d t \right)$$

$$c(t) = 1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \operatorname{sen} \left( \omega_d t + \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \right) \right), \text{ para } t \geq 0 \quad (2.3.2.13)$$

Utilizando la tabla de transformadas de Laplace, se puede obtener fácilmente el resultado que se muestra. Esta ecuación indica que la frecuencia de las oscilaciones transitorias disminuye debido a la frecuencia natural  $\omega_d$  y “cambia dependiendo del factor de amortiguamiento relativo  $\zeta$ ”. La señal de error para este sistema se puede expresar de la siguiente manera:

$$e(t) = r(t) - c(t)$$

$$e(t) = e^{-\zeta\omega_n t} \left( \cos \omega_d t + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \operatorname{sen} \omega_d t \right), \quad \text{para } t \geq 0 \quad (2.3.2.14)$$

Esta señal de error representa “la oscilación sinusoidal amortiguada. En el estado estacionario o en  $t=\infty$ , no hay error entre la entrada y la salida”.

Cuando el factor de amortiguación relativo  $\zeta=0$ , la respuesta no se amortigua y la oscilación continúa indefinidamente. Sustituyendo  $\zeta = 0$  para el caso del amortiguamiento de la respuesta  $c(t)$  se obtiene:

$$c(t) = 1 - \cos \omega_n t, \quad \text{para } t \geq 0 \quad (2.3.2.15)$$

Por lo tanto, se ha determinado “que  $\omega_n$  representa la frecuencia natural no amortiguada del sistema, es decir, la frecuencia a la que oscilaría el sistema si no existiera amortiguamiento”. Si un sistema lineal tiene cierto grado de amortiguamiento, “la frecuencia natural no amortiguada no se puede observar experimentalmente”. La frecuencia que se observa “es la frecuencia natural amortiguada  $\omega_d$ , que siempre es menor que la frecuencia natural no amortiguada”. Si  $\zeta$  aumenta, “la frecuencia natural

amortiguada  $\omega_d$  disminuye. Si  $\zeta$  aumenta más de 1, la respuesta del sistema está sobreamortiguada y ya no oscila”.

**b) Caso críticamente amortiguado ( $\zeta = 1$ ):** cuando los polos de “C(s)/R(s) son casi iguales, el sistema es aproximado a través uno críticamente amortiguado”. Ello considera R(s)=1/s y se obtiene de la siguiente forma:

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{(s + \omega_n)^2 s} \quad (2.3.2.16)$$

Aplicamos la transformada inversa y obtenemos:

$$c(t) = 1 - e^{-\omega_n t}(1 + \omega_n t), \quad \text{para } t \geq 0 \quad (2.3.2.17)$$

Para obtener este resultado se considera “que  $\zeta$  se aproxima a la unidad en la Ecuación (2.3.2.13)” y utilizando el límite siguiente:

$$\lim_{\zeta \rightarrow 1} \frac{\text{sen } \omega_d t}{\sqrt{1 - \zeta^2}} = \lim_{\zeta \rightarrow 1} \frac{\text{sen } \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} t}{\sqrt{1 - \zeta^2}} = \omega_n t$$

**c) Caso sobreamortiguado ( $\zeta > 1$ ):** “los polos de C(s)/R(s) son reales negativos y diferentes. Para una entrada escalón unitario, R(s)=1/s, se considera C(s)”:

$$C(s) = \frac{\omega_n^2}{(s + \zeta\omega_n + \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1})(s + \zeta\omega_n - \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1})s} \quad (2.3.2.18)$$

Aplicando la transformada inversa se obtiene:

$$c(t) = 1 + \frac{1}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}(\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})} e^{-(\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t} - \frac{1}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}(\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})} e^{-(\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t}$$

$$= 1 + \frac{\omega_n}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} \left( \frac{e^{-s_1 t}}{s_1} - \frac{e^{-s_2 t}}{s_2} \right), \quad \text{para } t \geq 0 \quad (2.3.2.19)$$

Donde:

$$s_1 = (\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n$$

$$s_2 = (\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n$$

Así, la respuesta  $c(t)$  “contiene dos términos exponenciales que caen. Si  $\zeta$  es mayor que la unidad, una de las dos exponenciales cae mucho más rápido que la otra. Es decir, si  $s_2$  está mucho más cerca del eje  $j\omega$  que  $-s_1$ , lo que significa que  $|s_2| \ll |s_1|$ ”, entonces  $-s_1$  puede desprejarse para la solución aproximada. Si excluimos el término exponencial de decaimiento más rápido, nos quedamos con la misma respuesta que para el sistema de primer orden y se puede aproximar:

$$C(s) = \frac{\zeta\omega_n - \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}}{(s + \zeta\omega_n - \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1})s} \quad (2.3.2.20)$$

Entonces se obtiene la respuesta del tiempo  $c(t)$  es:

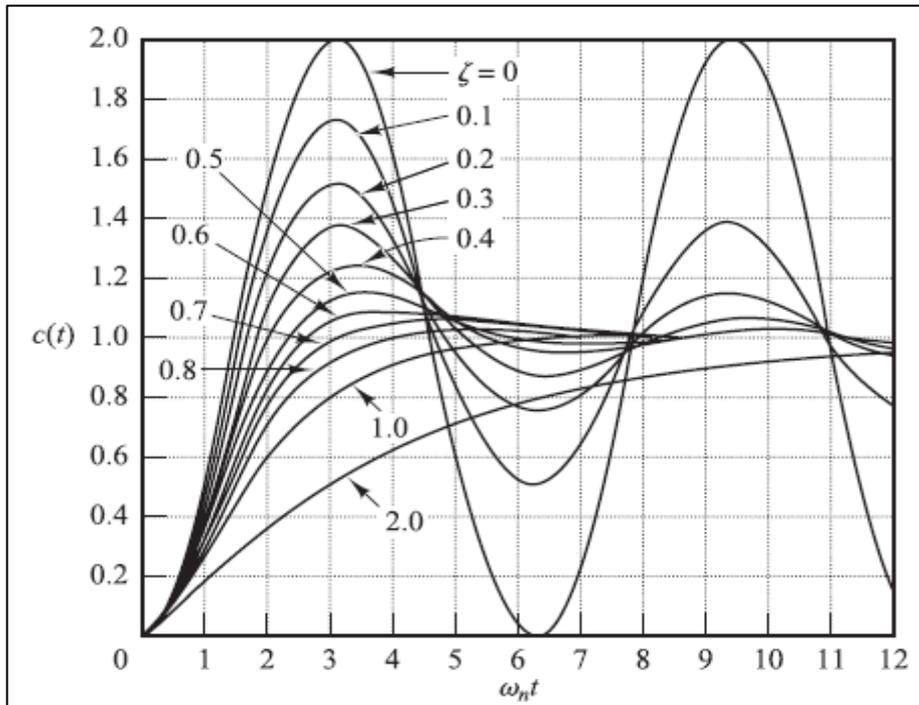
$$c(t) = 1 - e^{-(\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t}, \quad \text{para } t \geq 0 \quad (2.3.2.21)$$

En la cual da una respuesta aproximada de paso unitario cuando se puede puentear uno de los polos.

La Fig. 27 muestra un conjunto de curvas  $c(t)$  con diferentes valores de  $\zeta$ , donde la abscisa es la cantidad adimensional  $\omega_n t$ .

**Figura 27**

*Curvas de respuesta a escalón unitario del sistema mostrado en la Figura 26.*



Fuente: Ogata (2010)

Las curvas sólo son funciones de  $\zeta$  y se obtienen a partir de las ecuaciones (2.3.2.13), (2.3.2.17) y (2.3.2.19). El sistema se encontraba inicialmente en reposo.

La figura 27 muestra que un sistema infraamortiguado con valores  $0,5 < \zeta < 0,8$  se aproxima al valor final más rápidamente que un sistema críticamente amortiguado o sobreamortiguado. También se comprobó que, entre los sistemas que responden sin oscilaciones, el que responde más rápidamente es el sistema críticamente amortiguado, frente al sistema sobreamortiguado, que siempre responde lentamente a las entradas.

Especificaciones en el dominio del tiempo (Time Domain Specs):

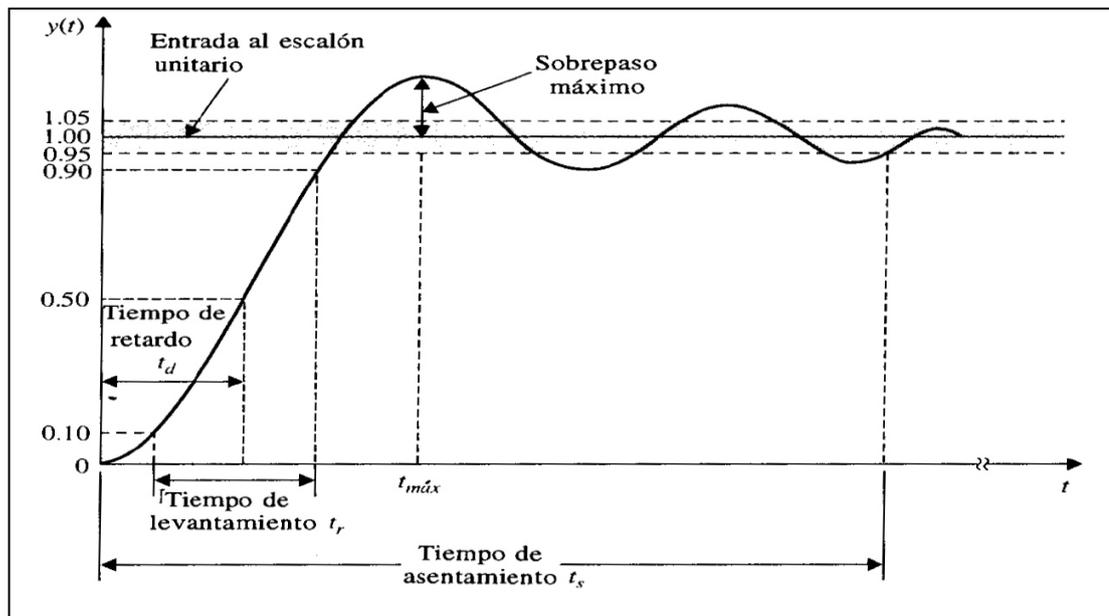
- a. Tiempo de retardo: “es el tiempo que transcurre desde que se aplica una señal de entrada hasta que el sistema alcanza la mitad de su valor final”.

- b. Tiempo de subida: “es el tiempo que tarda el sistema en responder a una señal de entrada y pasar del 10% al 90%, del 5% al 95% o del 0% al 100% de su valor final”.
  - c. Tiempo de pico: “es el tiempo que transcurre hasta que la respuesta del sistema alcanza su primer pico máximo de subida o rebasamiento”.
  - d. Sobrepasso máximo: “es el pico máximo de la curva de respuesta medido a partir del valor unitario”.
  - e. Tiempo de enfriamiento ( $T_s$ ): “Tiempo necesario para que la curva de respuesta alcance y se mantenga dentro de un intervalo en torno al valor final de la magnitud indicada por el porcentaje absoluto del valor final (normalmente, del 2 % al 5 %)”.
- El criterio de porcentaje de error que debe utilizarse viene determinado por el objetivo de diseño del sistema.

En la figura 28 se muestra una respuesta típica de un sistema de control a una entrada de escalón unitario.

**Figura 28**

*Respuesta típica de un sistema de control a una entrada escalón unitario*



Fuente: Ogata (2010)

Para comparar varios diseños de sistemas de control “se debe de utilizar como función de prueba al escalón unitario y se debe de considerar las condiciones iniciales igual a cero”.

### A) Fórmulas para los parámetros de un sistema de segundo orden sub-amortiguado

Estas fórmulas permiten determinar los parámetros de los sistemas subamortiguados:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.3.2.22)$$

**Sobrepaso Máximo ( $m_p$ ):** se representa en el tiempo pico 0 en  $t = t_p = \pi/\omega_d$ . Por tanto, a partir de la ecuación (2.4.2.13),  $m_p$  se obtiene como:

$$\begin{aligned} m_p &= c(t_p) - 1 \\ &= e^{-\zeta\omega_n(\pi/\omega_d)} \left( \cos \pi + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \operatorname{sen} \pi \right) \\ &= e^{-(\sigma/\omega_d)\pi} \\ &= e^{-(\zeta/\sqrt{1-\zeta^2})\pi} \end{aligned} \quad (2.3.2.23)$$

El porcentaje de sobrepaso máximo es  $e^{-(\sigma/\omega_d)\pi} \times 100\%$

También se puede utilizar:

$$m_p = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \quad (2.3.2.24)$$

Donde  $y(t_p)$  es el valor de salida en un tiempo máximo de sobrepaso, en tanto  $y(\infty)$  es el valor que tiene la salida en estado estable al momento en que desaparece la respuesta transitoria.

Asimismo, “la expresión para el factor de amortiguamiento relativo  $\zeta$  en función del sobrepaso  $m_p$  es”:

$$\zeta = \frac{-\ln\left(\frac{\%m_p}{100}\right)}{\sqrt{\pi^2 + \left(\ln\left(\frac{\%m_p}{100}\right)\right)^2}} \quad (2.3.2.25)$$

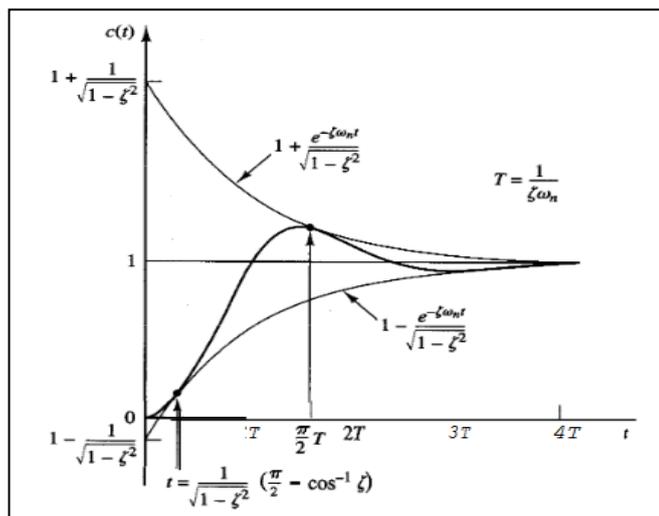
**Tiempo de asentamiento ( $t_s$ ):** la respuesta transitoria se obtiene a partir de la ecuación (2.4.2.13)

$$c(t) = 1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \operatorname{sen}\left(\omega_d t + \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right)\right), \quad \text{para } t \geq 0$$

Las curvas  $1 \pm (e^{-\zeta\omega_n t}/\sqrt{1-\zeta^2})$ , “son las curvas envolventes de respuesta transitoria para la entrada escalonada. Esta curva que siempre está dentro de un par de curvas envolventes”, (Figura 29). La constante de tiempo de estas curvas envolventes depende del valor de  $\zeta\omega_n$ . El tiempo de asentamiento, o tiempo que tarda en estabilizarse la respuesta transitoria, “es mayor para un sistema débilmente amortiguado que para un sistema moderadamente amortiguado para un valor dado de  $\omega_n$  y para un intervalo de  $\zeta$  entre 0 y 1”.

**Figura 29**

*Par de curvas envolventes para la curva de respuesta escalón unitario del sistema que aparece en la Figura 26.*



Fuente: Ogata (2010)

“El tiempo de asentamiento, o el tiempo que tarda en estabilizarse la respuesta transitoria dentro de una banda de tolerancia del 2% o del 5%”, es medido utilizando la constante de tiempo  $T=1/(\zeta\omega_n)$  basándose en la Fig. 27 en los valores de  $\zeta$  (Figura 30). Para el intervalo  $0 < \zeta < 0,9$ , cuando se utiliza el criterio del 2%, el tiempo de asentamiento “es aproximadamente cuatro veces la constante de tiempo del sistema”. Con el criterio del 5%, el tiempo “es aproximadamente a tres veces la constante”. Se observa que “el tiempo de asentamiento alcanza un valor mínimo cerca de  $\zeta=0,76$  (para el criterio del 2%) o  $\zeta=0,68$  (para el criterio del 5%) y luego aumenta casi de manera lineal para valores grandes de  $\zeta$ ”. Las irregularidades en las curvas de la Fig. 30 son debido a que un cambio mínimo en el valor de  $\zeta$  puede causar cambios en el tiempo de asentamiento.

Al comparar la respuesta de los sistemas, solemos definir el tiempo de estabilización  $t_s$  del siguiente modo por comodidad

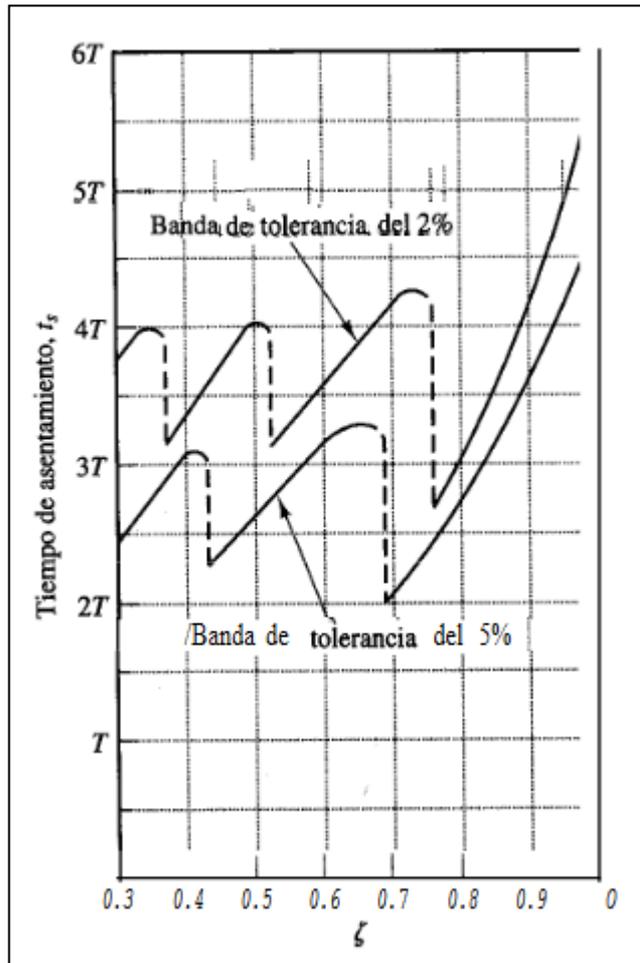
$$t_s = 4T = \frac{4}{\zeta\omega_n}, \text{ criterio del 2\%} \quad (2.3.2.26)$$

$$t_s = 3T = \frac{3}{\zeta\omega_n}, \text{ criterio del 5\%} \quad (2.3.2.27)$$

Se ha observado que el tiempo de estabilización de la respuesta transitoria “es inversamente proporcional al producto del factor de amortiguamiento relativo  $\zeta$  y la frecuencia natural no amortiguada del sistema  $\omega_n$ ”. Dado que “el valor de  $\zeta$  a menudo se fija en función del máximo rebasamiento permitido, el tiempo de asentamiento principalmente depende de la frecuencia natural no amortiguada  $\omega_n$ ”. Esto significa que se puede cambiar el tiempo que tarda el sistema en estabilizarse sin alterar el máximo rebasamiento, ajustando la frecuencia natural no amortiguada  $\omega_n$ .

**Figura 30**

*Curvas de tiempo de asentamiento  $t_s$  contra  $\zeta$*

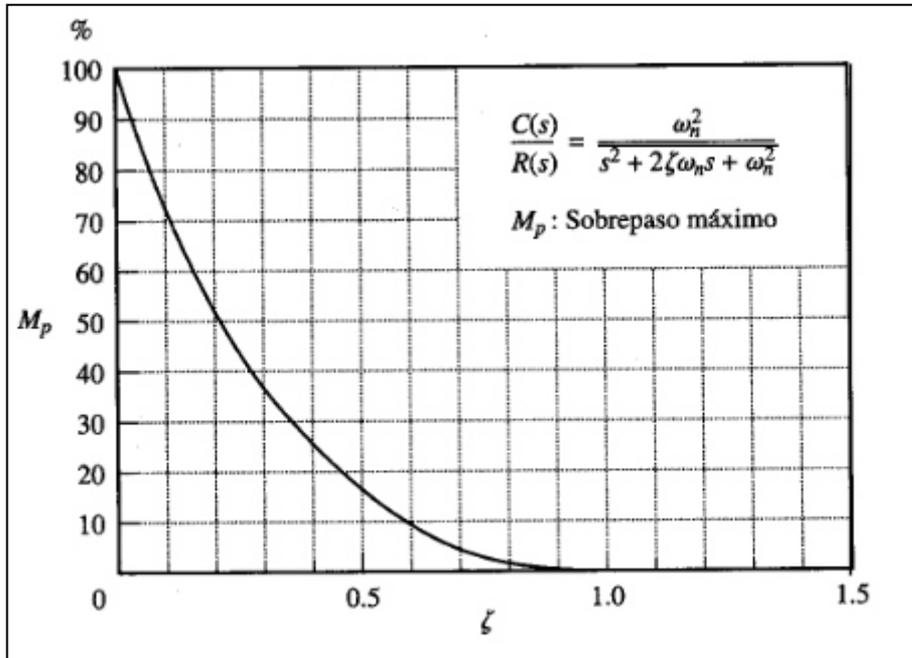


Fuente: Ogata, 2010

El análisis anterior sugiere que “para obtener una respuesta rápida, la frecuencia natural no amortiguada  $\omega_n$  debe ser alta”. Al mismo tiempo, “para limitar el máximo rebasamiento  $m_p$  y reducir el tiempo de estabilización, el factor de amortiguamiento relativo  $\zeta$  no debe ser muy pequeño”. La figura 31 muestra la relación entre el porcentaje de rebasamiento máximo  $m_p$  y el factor de amortiguamiento relativo  $\zeta$ .

**Figura 31**

Curva de  $m_p$  contra  $\zeta$



Fuente: Ogata (2010)

**Tiempo de levantamiento ( $t_r$ ):** retomando de la ecuación (2.3.2.13), se obtiene el tiempo de levantamiento  $t_r$ , suponiendo que  $c(t_r) = 1$ , o que

$$c(t_r) = 1 = 1 - e^{-\zeta\omega_n t_r} \left( \cos \omega_d t_r + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \operatorname{sen} \omega_d t_r \right) \quad (2.3.2.28)$$

Dado que  $e^{-\zeta\omega_n t_r} \neq 0$ , se obtiene partiendo de (2.3.2.28)

$$\cos \omega_d t_r + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \operatorname{sen} \omega_d t_r = 0$$

O también:

$$\tan \omega_d t_r = -\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} = -\frac{\omega_d}{\sigma}$$

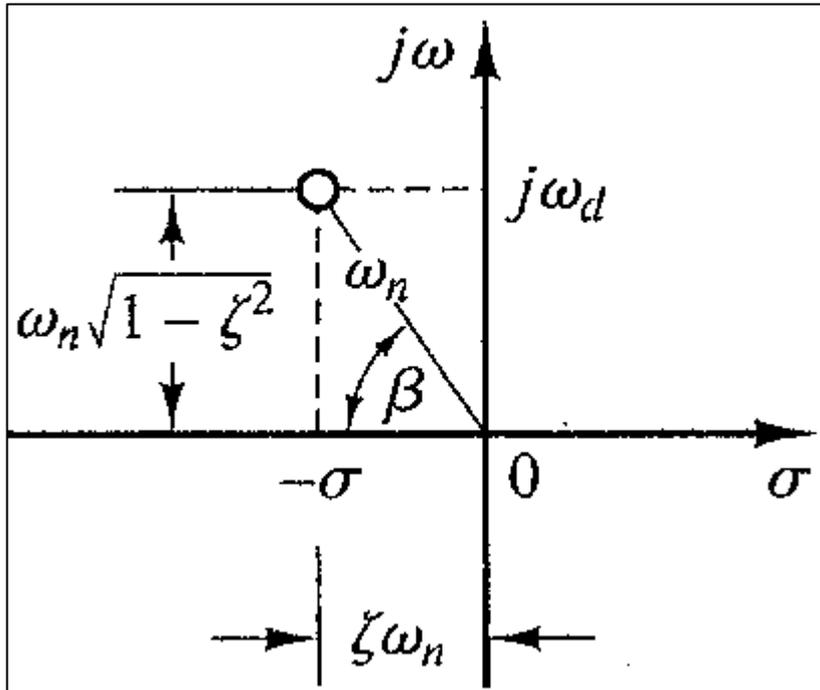
Por lo tanto, se tiene que el tiempo de levantamiento  $t_r$  es

$$t_r = \frac{1}{\omega_d} \tan^{-1} \left( \frac{\omega_d}{-\sigma} \right) = \frac{\pi - \beta}{\omega_d} \quad (2.3.2.29)$$

Donde  $\beta$  se puede definir en la siguiente Figura. 32, se puede visualizar que para un valor pequeño de  $t_r$ ,  $\omega_d$  debe ser grande.

**Figura 32**

*Definición del ángulo  $\beta$*



Fuente: Ogata (2010)

**Tiempo pico ( $t_p$ ):** De la ecuación (2.3.2.13), se determinan el tiempo pico diferenciando  $c(t)$  con respecto a  $t$  y suponiendo que esta derivada es cero, por lo tanto

$$\frac{dc}{dt} = \zeta e^{-\zeta\omega_n t} \left( \cos \omega_d t + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \operatorname{sen} \omega_d t \right) + e^{-\zeta\omega_n t} \left( \omega_d \operatorname{sen} \omega_d t + \frac{\zeta\omega_d}{\sqrt{1-\zeta^2}} \cos \omega_d t \right)$$

Los términos de coseno se cancelan uno al otro y  $dc/dt$ , evaluada en  $t = t_p$ , es simplificado a:

$$\left. \frac{dc}{dt} \right|_{t=t_p} = (\operatorname{sen} \omega_d t_p) \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t_p} = 0$$

Generando la ecuación siguiente:

$$\text{sen } \omega_d t_p = 0$$

O bien,

$$\omega_d t_p = 0, \pi, 2\pi, 3\pi, \dots \dots \dots$$

Dado que el tiempo pico corresponde al primer pico sobrepaso máximo

$$\omega_d t_p = \pi :$$

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d} \quad (2.3.2.30)$$

El tiempo pico  $t_p$  correspondiente a la mitad del ciclo de la frecuencia de oscilación amortiguada.

**Tiempo de retardo ( $t_d$ ):**

$$t_d \cong \frac{1+0.7\zeta}{\omega_n} \text{ para } 0 < \zeta < 1$$

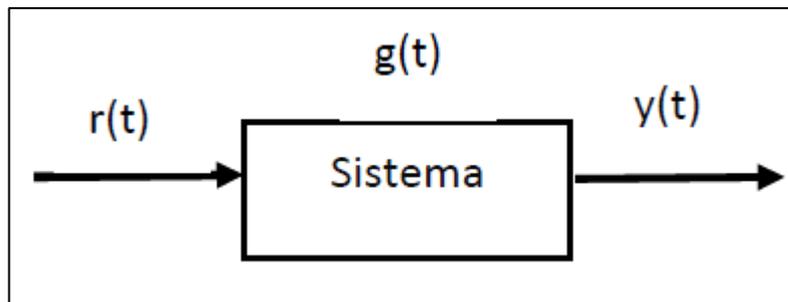
En un sistema de control, las respuestas transitorias pueden generar oscilaciones amortiguadas incluso antes que se logre el estado estable, todo esto se origina en la práctica. Esto sucede a que los sistemas cuentan con componentes que pueden almacenar energía pero no responden inmediatamente a los cambios de entrada.

### 2.3.3. Sistema de control

“En un sistema de control automático se le aplica una señal de entrada  $r(t)$  para obtener una salida  $y(t)$ ” (Ogata, 2010). El sistema también llamado “planta, relaciona la salida con la entrada” como se muestra en la Figura. 33.

### Figura 33

Diagrama de bloques del sistema de control.



Fuente: Ogata (2010)

Donde:

$r(t)$ : Entrada (input).

$g(t)$ : Sistema (transfer function).

$y(t)$ : Salida (output).

Tipos de acción de control:

#### 2.3.3.1. Controlador On-Off

Es un sistema de control de dos posiciones fijas.

$$u(t) = U1, \text{ para } e(t) > 0 \quad (2.3.3.1.1)$$

$$u(t) = U2, \text{ para } e(t) < 0 \quad (2.3.3.1.2)$$

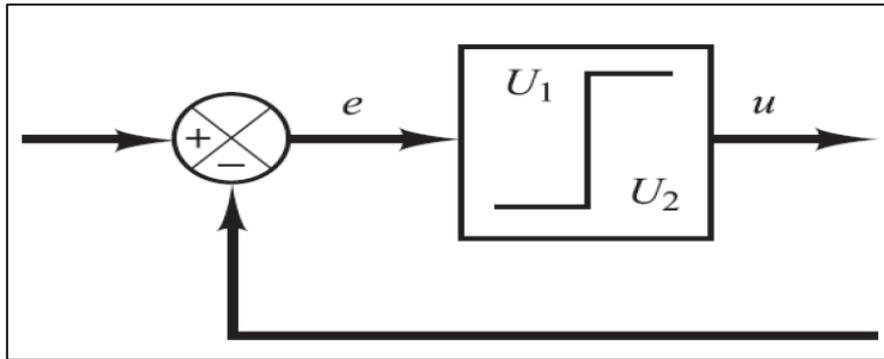
Donde:

$U1, U2$  : Son constantes

$u(t)$ : Salida del controlador

**Figura 34**

*Diagrama de bloques de un controlador ON-OFF.*



Fuente: Ogata (2010)

### 2.3.3.2. Acción de control proporcional

La salida del controlador  $u(t)$  se relaciona con la señal de error  $e(t)$ , para un controlador con acción de control proporcional está dada por:

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.3.3.2.1)$$

Aplicando la transformada de Laplace:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (2.3.3.2.2)$$

Donde:

$K_p$ : Es la constante de ganancia proporcional.

$e(t)$ : Es el error.

### 2.3.3.2. Acción de control integral

El valor de salida del controlador mediante la acción del control integral  $u(t)$ , es cambiada a una razón en proporción a la señal de error que se genera  $e(t)$ .

$$\frac{d u(t)}{d(t)} = K_i e(t) \quad (2.3.3.2.3)$$

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.3.3.2.4)$$

Donde  $K_i$  es una constante ajustable.

Representada por:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (2.3.3.2.5)$$

### 2.3.3.3. Controlador Proporcional-Integral

La salida del controlador  $u(t)$  relacionada con la señal de error  $e(t)$ , se define:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (2.3.3.3.1)$$

Donde  $T_i$  se denomina tiempo integral. La función de transferencia del controlador está representada por:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (2.3.3.3.2)$$

### 2.3.3.4. Controlador Proporcional-Derivativo

La salida del controlador  $u(t)$  relacionada con la señal de error  $e(t)$ , se define:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.3.3.4.1)$$

Donde  $T_d$  es el tiempo derivativo. La función de transferencia del controlador está representada por:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s) \quad (2.3.3.4.2)$$

### 2.3.3.5. Controlador Proporcional-Integral-Derivativo

“La combinación de control proporcional, control integral y control derivativo se conoce como control proporcional-integral-derivativo (PID)”. Esta técnica de control “tiene las ventajas de cada una de las tres acciones de control separadas” y se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.3.3.5.1)$$

“La función de transferencia del controlador” está representada por:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.3.3.5.2)$$

Donde:

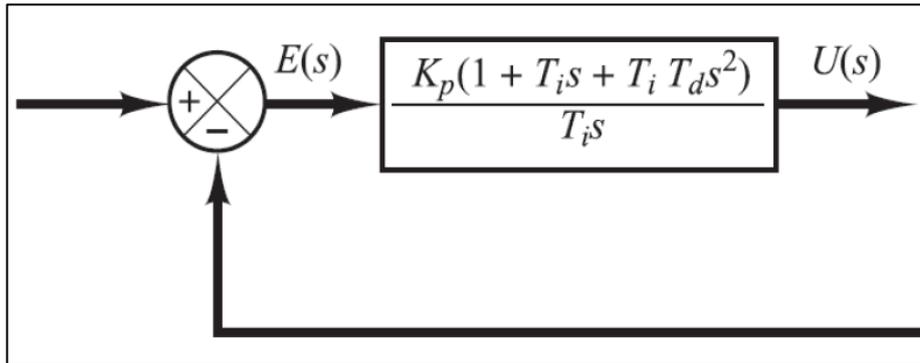
$K_p$ : “Es la ganancia proporcional”.

$T_i$ : “Es el tiempo integral”.

$T_d$ : “Es el tiempo derivativo”.

**Figura 35**

*Diagrama de bloques de un controlador PID.*



Fuente: Ogata (2010)

### 2.3.3.6. Método de Root Locus (Lugar geométrico de las raíces)

En el análisis de control, la raíz es “la posición geométrica de los polos y ceros de la función de transferencia cuando la ganancia K del sistema cambia en un intervalo determinado”. Utilizando el método de la raíz, “la función de transferencia en bucle abierto se puede utilizar para determinar la posición de los polos en la función de transferencia en bucle cerrado para un valor dado de ganancia K”. El lugar de la raíz “es una herramienta útil para analizar sistemas dinámicos lineales de una sola entrada y una sola salida (SISO) y su estabilidad (estabilidad BIBO)”. Un sistema es estable “si todos sus polos están en el semiplano izquierdo del plano s (para sistemas continuos) o en el círculo unitario del plano z (para sistemas discretos). Si  $G(s)H(s)$  es la función de transferencia de un sistema abierto, entonces todos los puntos del plano complejo que satisfacen la ecuación característica son los polos del sistema”.

$$+k G(s)H(s) = 0$$

Ordenando la ecuación:

$$1 + \frac{K(s+z_1)(s+z_2)\dots(s+z_m)}{(s+p_1)(s+p_2)\dots(s+p_m)} = 0 \quad (2.3.3.6.1)$$

La ganancia  $K$  que es el parámetro de importancia, donde  $K > 0$ . (Si  $K < 0$ , debe modificarse la condición del ángulo siempre y cuando corresponda al caso de realimentación positiva).

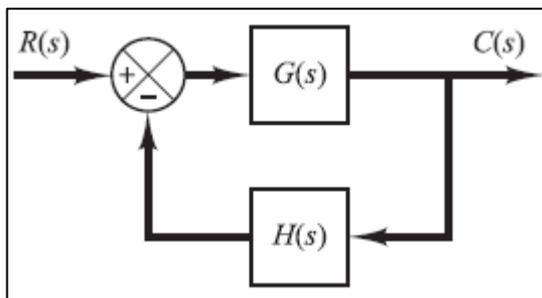
#### A) Reglas del lugar geométrico de raíces (Root Locus)

Existen reglas que permiten trazar el lugar de la raíz sin necesidad de resolver la ecuación característica, lo que hace que este método sea aplicable a sistemas complejos. Estas reglas permiten trazar el lugar geométrico de la raíz para valores positivos de  $k$ . Para valores negativos de  $k$ , se utilizan reglas similares.

**1- Situar los polos y los puntos cero de  $G(s)H(s)$  en el plano  $s$ .** Los puntos de ramificación de las raíces comienzan en los polos de la espira abierta y terminan en los ceros.

**Figura 36**

*Sistema de control.*



Fuente: Ogata (2010)

Para determinar la posición de los polos y ceros en el plano  $s$  en un bucle abierto, “es necesario partir de la forma factorizada de la función de transferencia en ese bucle”. En general, “el número de polos en un bucle abierto es mayor que el número de ceros, por lo que el número de ramas del lugar de la raíz será igual al número de polos”. Si el número de polos del bucle cerrado es igual al número de polos del bucle abierto, “entonces el número de ramas individuales del lugar de la raíz que terminan en los ceros terminales del bucle abierto será igual al número de ceros del bucle abierto”. El número de polos abiertos es igual al número de ceros abiertos “si se incluyen los polos y ceros en el infinito.

Por lo tanto, podemos decir que las posiciones de las raíces comienzan en los polos de  $G(s)H(s)$  y terminan en los ceros de  $G(s)H(s)$  a medida que  $K$  aumenta de cero a infinito, incluyendo tanto los polos y ceros finitos como los infinitos en el plano  $s$ ".

2 - Para determinar la posición de las raíces en el eje real, primero se deben determinar los polos y ceros de la espira abierta. Luego, se debe tener en cuenta que la contribución angular de los polos y ceros complejos conjugados es de  $360^\circ$  en el eje real, "por lo que no afectan a las posiciones de las raíces en el eje real. Si se elige un punto en el eje real y el número total de polos y ceros reales a la derecha de ese punto es impar, entonces ese punto se considera la ubicación de la raíz".

3 - Determina las asíntotas del punto raíz. "Si el punto de prueba  $s$  está lejos del origen, se supone que el ángulo de cada dimensión compleja no cambia". Por lo tanto, el punto cero y el polo del circuito desconectado se anulan mutuamente. Por lo tanto, para valores muy grandes de  $s$ , la posición de las raíces debe ser asintótica a las rectas cuyos ángulos se obtienen:

$$\text{Ángulos de las asíntotas} = \frac{\pm 180^\circ(2k+1)}{n-m}, \text{ para } k = 0, 1, 2, \dots \text{ (2.3.3.6.2)}$$

Donde:

$n =$  número de polos finitos de  $G(s)H(s)$

$m =$  número de ceros finitos de  $G(s)H(s)$

En este caso  $k=0$  corresponde a las asíntotas con el menor ángulo respecto al eje real. Aunque  $k$  puede tomar infinitos valores, el ángulo se repite con  $k$  creciente y el número de asíntotas diferentes es  $n-m$ .

Para obtener el intercepto, el numerador y el denominador de la función de transferencia en bucle abierto deben expandirse para obtener el siguiente resultado.

$$G(s)H(s) = \frac{K[s^m + (z_1 + z_2 + \dots + z_m)s^{m-1} + \dots + z_1 z_2 \dots z_m]}{s^n + (p_1 + p_2 + \dots + p_n)s^{n-1} + \dots + p_1 p_2 \dots p_n} \quad (2.3.3.6.3)$$

Si se localiza muy lejos del origen un punto de prueba se puede escribir  $G(s)H(s)$ , dividiendo el denominador entre el numerador de la siguiente manera.

$$G(s)H(s) = \frac{K}{\left[ s + \frac{(p_1 + p_2 + \dots + p_n) - (z_1 + z_2 + \dots + z_m)}{n - m} \right]^{n-m}} \quad (2.3.3.6.4)$$

Si ponemos a cero el denominador de la parte derecha de la ecuación (2.3.3.6.4), obtenemos la abscisa de la intersección de las asíntotas con el eje real, y  $s$  se borra.

$$s = - \frac{(p_1 + p_2 + \dots + p_n) - (z_1 + z_2 + \dots + z_m)}{n - m} \quad (2.3.3.6.5)$$

Las asíntotas muestran “el comportamiento del lugar raíz de  $|s| \gg 1$ . La ramificación del lugar raíz puede estar a un lado de la asíntota correspondiente o puede cruzar la asíntota de un lado a otro”.

4 - Para encontrar los puntos de entrada y de ruptura, es necesario considerar la simetría conjugada del lugar geométrico de la raíz. Estos puntos “pueden encontrarse en el eje real o pueden aparecer en pares de complejos conjugados”. Si el lugar raíz se encuentra entre dos puntos cero adyacentes en el eje real, “habrá al menos un punto de entrada entre ellos. Del mismo modo, si el lugar de la raíz se encuentra entre dos polos abiertos adyacentes en el eje real, habrá al menos un punto de nodo entre estos dos polos”. Si el lugar raíz se encuentra entre un punto nulo en el eje real y un polo en un bucle abierto, “puede que no haya puntos de ruptura o puntos de entrada, o al menos ambos”.

Supongamos que obtenemos la ecuación característica de la siguiente manera:

$$B(s) + KA(s) = 0 \quad (2.3.3.6.6)$$

“Los puntos de entrada y de ruptura corresponden a varias raíces de la ecuación característica”. Así, los puntos de entrada y de ruptura vienen determinados por las raíces:

$$\frac{dK}{ds} = -\frac{B'(s) - B(s)A'(s)}{A^2(s)} = 0 \quad (2.3.3.6.7)$$

Los puntos de entrada y ruptura deben ser raíces de cierta ecuación matemática, pero “no todas las raíces de esta ecuación son necesariamente puntos de entrada o ruptura”. Si la raíz real de esta ecuación no está en la parte axial real del lugar geométrico de la raíz, entonces no es ni una entrada ni un punto de ruptura. Sin embargo, “si la raíz real de esta ecuación sí está en la parte axial real del lugar geométrico de la raíz, entonces es una entrada real o un punto de ruptura real”. Si las dos raíces de esta ecuación son un par complejo conjugado, es posible verificar su valor de K correspondiente para determinar si son puntos de entrada o ruptura. Si el valor de K correspondiente a la raíz es positivo, entonces es un punto de entrada o ruptura. Si es negativo, entonces no es ni un punto de entrada ni un punto de ruptura.

5- Para determinar el ángulo de salida o llegada desde un polo complejo o cero complejo hacia un lugar de la raíz, “es necesario calcular las direcciones del lugar raíz cerca de los polos y ceros complejos”. Si se selecciona un punto de prueba y se desplaza cerca de un polo complejo o cero complejo, “la suma de las contribuciones angulares de todos los demás polos y ceros se mantiene constante”. Por lo tanto, para “calcular el ángulo de salida o llegada desde el punto raíz hacia el polo complejo o cero complejo, se debe restar 180 grados de la suma de todos los ángulos vectoriales desde los demás polos y ceros hacia ese polo complejo o cero complejo, teniendo en cuenta sus signos”. El ángulo de

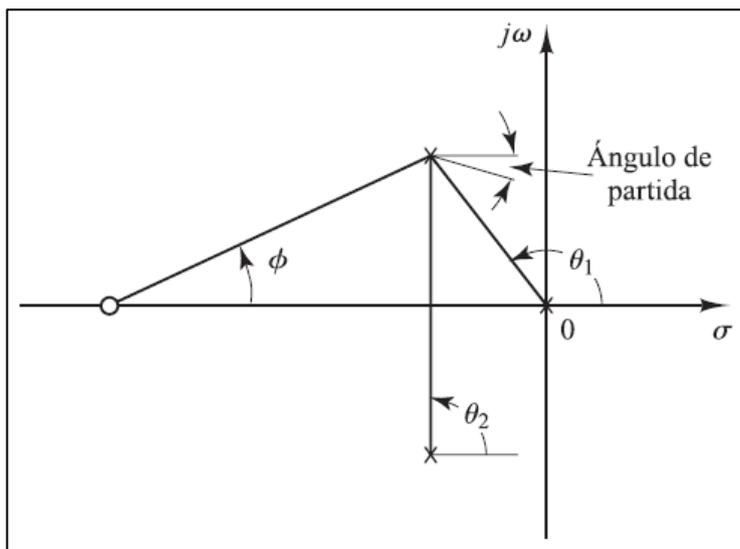
salida desde el polo complejo “se obtiene restando a 180 grados la suma de los ángulos vectoriales desde los otros polos hacia ese polo complejo, mientras que el ángulo de llegada al cero complejo se calcula restando a 180 grados la suma de los ángulos vectoriales desde los otros ceros hacia ese cero complejo”.

6- Los puntos en los que el lugar de la raíz interseca el eje imaginario se pueden encontrar utilizando “el criterio de estabilidad de Routh o asumiendo que  $s=j\omega$  en la ecuación característica y resolviendo para encontrar los valores de  $\omega$  para los que las partes real e imaginaria son iguales a cero”. Los valores de  $\omega$  encontrados “representan las frecuencias en las que el lugar de la raíz interseca el eje imaginario. Además, el valor de  $K$  correspondiente a cada frecuencia de transición da la ganancia en ese punto de transición”.

7- En la localización de las raíces, la parte más importante a considerar no es el eje real ni las asíntotas, sino la región cercana al origen y al eje  $j\omega$ . Es importante obtener una precisión suficiente al determinar la forma de las ubicaciones de las raíces en esta región del plano  $s$ .

**Figura 37**

*Construcción del lugar de las raíces. [Ángulo de salida =  $180^\circ - \theta_1 + \theta_2 + \phi$ ].*



Fuente: Ogata (2010)

8- Para determinar los polos del circuito cerrado, es necesario evaluar si el valor de K en cada punto de las raíces cumple con la condición de magnitud. Si se cumple, ese punto concreto de cada rama del lugar geométrico de la raíz será un polo cerrado. La condición de tamaño también se puede utilizar para encontrar el valor de la ganancia K en cada punto de las raíces por encima del lugar.

El valor de K correspondiente a cualquier punto s por encima de la zona radicular se obtiene utilizando la condición de tamaño, en caso contrario.

$$K = \frac{\text{producto de las longitudes entre el punto } s \text{ y los polos}}{\text{producto de las longitudes entre el punto } s \text{ y los ceros}} \quad (2.3.3.6.8)$$

Si se conoce la ganancia K de la función de transferencia en el lazo abierto, "la condición de tamaño se puede utilizar para encontrar las ubicaciones correctas de los polos en lazo cerrado para un K dado en cada rama de los sitios raíz mediante el método de prueba y error<sup>2</sup>.

## **CAPÍTULO III. METODOLOGÍA**

En este capítulo se menciona los materiales y métodos a utilizar para el desarrollo del prototipo.

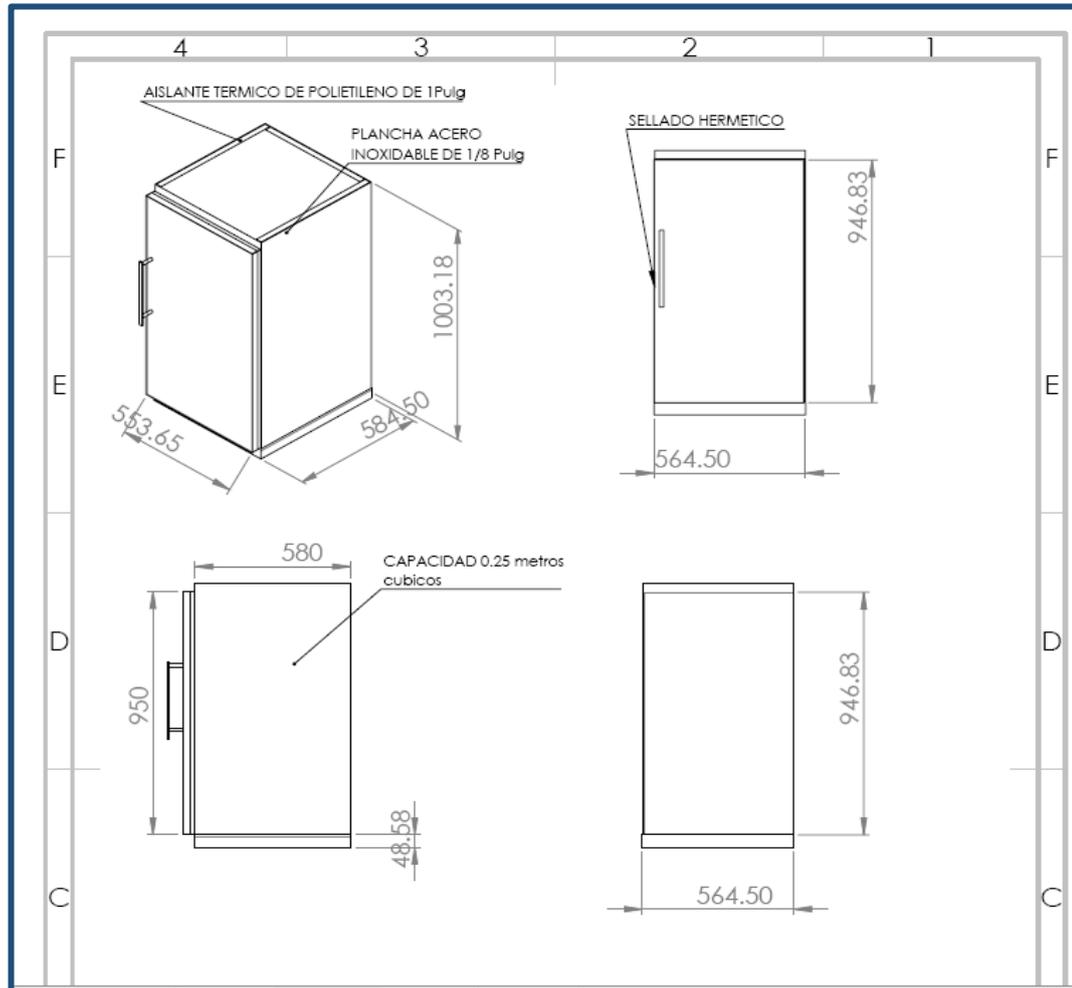
### **3.1 Materiales**

#### **1. Fabricación de estructura de la cámara.**

Tal como se muestra en la Figura. 38, se muestra un bosquejo en AutoCAD de cómo serían las medidas de la cámara de atmósfera controlada para la solución propuesta.

**Figura 38**

*El armazón, aislamiento y la cámara de limpieza.*



Elaborado por: los autores

## 2. Compresor

Marca: TECUMSEH BRASIL Modelo: AE4440YS (Figura.39).

La refrigeración por compresión consiste en la circulación mecánica forzada de un líquido en un circuito cerrado mediante la creación de zonas de alta y baja presión, de modo que el líquido absorbe calor en un punto y lo libera en otro.

**Figura 39**

Compresor Marca TECUMSEH BRASIL Modelo: AE4440YS



**Technical Data Sheet**

9/19/2017

Tecumseh

---

**Model: AE4440Y-AA1A (AE4440Y-AA)**

---

**Product Description**

Type: Reciprocating  
 Application: HBP/CBP - High/Commercial  
                   Back Pressure  
 Refrigerant: R-134a/R-513A  
 Voltage/Frequency: 115V ~ 60Hz  
 Version: N/A

---

**Product Specifications**

**Performance**

Condition	Test Voltage	Refrigeration Capacity			Input Power		Efficiency			EVAP TEMP	COND TEMP	AMBIENT TEMP	RETURN GAS	LIQUID TEMP
		Btu/h	kcal/h	W	W	Btu/Wh	kcal/Wh	W/W						
ASHRAE (R-134a)	115V ~ 60HZ	4350	1096	1275	550	7.91	1.99	2.32	7.2°C (45°F)	54°C (130°F)	35°C (95°F)	35°C (95°F)	46°C (115°F)	
ARI (R-513A)	115V ~ 60HZ	4213	1062	1234	610	6.91	1.74	2.02	7.2°C (45°F)	54°C (130°F)	35°C (95°F)	18.3°C (65°F)	46°C (115°F)	
ASHRAE (R-513A)	115V ~ 60HZ	4528	1141	1327	611	7.4	1.87	2.17	7.2°C (45°F)	54°C (130°F)	35°C (95°F)	35°C (95°F)	46°C (115°F)	

---

**General**

Evaporating Temp. Range: -15°C to 15°C (5°F to 59°F)  
 Motor Torque: High Start Torque (HST)  
 Compressor Cooling: Fan

**Mechanical**

Weight: 10  
 Weight Unit of Measure: KG  
 Displacement (cc): 10.33  
 Oil Type: Polyolester  
 Viscosity (cSt): 32  
 Oil Charge (cc): 284.9

**Electrical**

Voltage Range (50 Hz): N/A  
 Voltage Range (60 Hz): 103-127  
 Locked Rotor Amps (LRA): 32  
 Rated Load Amps (RLA 50 Hz): 0  
 Rated Load Amps (RLA 60 Hz): 5.82  
 Max. Continuous Current (MCC in Amps): 8.81  
 Motor Resistance (Ohm) - Main: 1.65  
 Motor Resistance (Ohm) - Start: 3.44  
 Motor Type: C-SIR  
 Overload Type: N/A  
 Relay Type: N/A

Nota. DataSheet Compresor Marca TECUMSEH BRASIL Modelo: AE4440YS. Fuente: Tecumshe (2021)

### 3. Filtro Secador

Es un dispositivo que tiene dos funciones. Para filtrar o impedir la entrada de impurezas en el sistema y evitar la obstrucción del tubo capilar o restrictor, que por tanto debe situarse aguas arriba del restrictor para realizar esta función, el filtro consta de una malla cilíndrica a la entrada y otra malla a la salida con forma circular, como se muestra en la figura 40.

Características:

- De acero.
- Soldable y empotrable.
- Filtros VAL-22: inserto de fibra de vidrio y filtro/tapón de latón de malla 100.
- Recubrimiento electrostático en polvo, resistente a la corrosión.

#### **Figura 40**

*Filtro secador*



Fuente: Tecumshe (2021)

### 4. Unidad evaporadora

La fase de caída de presión y temperatura tiene lugar en el evaporador; aquí debe mantenerse siempre el flujo de refrigerante líquido. Una de las funciones del evaporador es asegurar el máximo intercambio entre el refrigerante y la zona a enfriar, lo que se consigue intercambiando aire o agua; de esta forma, la temperatura del refrigerante es absorbida y arrastrada a través del compresor, donde cambia de líquido a vapor y se crea un espacio libre en el que puede entrar refrigerante líquido adicional.

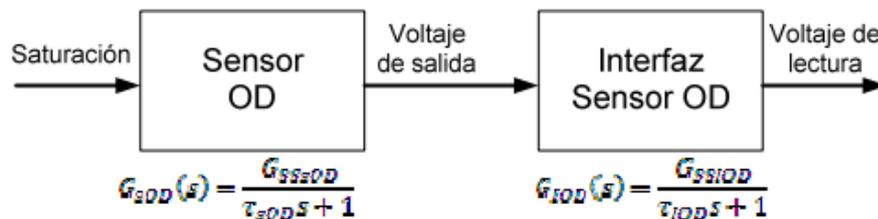
## 5. Válvula de expansión o capilar

El refrigerante (ya en estado líquido saturado) “entra en la válvula de expansión. Parte del calor latente se pierde debido a la irreversibilidad del proceso y el refrigerante entra en el evaporador como una mezcla de líquido y vapor”.

## 6. Sensores

### 6.1. Sensor de oxígeno

El sensor de oxígeno disuelto necesita un tiempo de 5 minutos para alcanzar 95% de la lectura final y tiene una salida de 47 (mV) promedio a 100% de saturación, en condiciones ambientales.



Para una saturación escalón de  $k=100\%$ , se obtiene una salida de 0.047 [V] y para un tiempo de respuesta  $3\tau$  (95%) = 300 [s], se tienen un  $\tau = 100$ . Por lo que, la función de transferencia del sensor de oxígeno disuelto es:

$$K = (K_{XO_2} * p'_{O_2}) M_{O_2} * 10^5 = 7.9251 \text{ [mg/l]}$$

$$G_{SOD}(S) = \frac{0.047/7.9251}{100_s + 1}$$

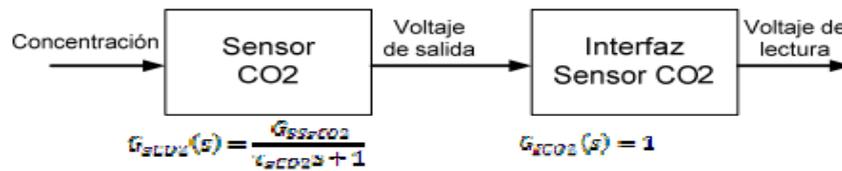
La interfaz del sensor es prácticamente instantánea en comparación con el mismo sensor, la función de transferencia es de orden cero, lo que constituye una ganancia igual a 80.

$$G_{IOF}(S) = 81$$

## 6.2 Sensor de dióxido de carbono (CO2)

Para el sensor de dióxido de carbono CO<sub>2</sub>, se sabe que el 63% de la señal de salida se alcanza en 20 segundos y tenemos un valor de 5V para una concentración del 20%.

Por lo que la interfaz del sensor es solamente un “seguidor de voltaje” se tiene una ganancia de 1.

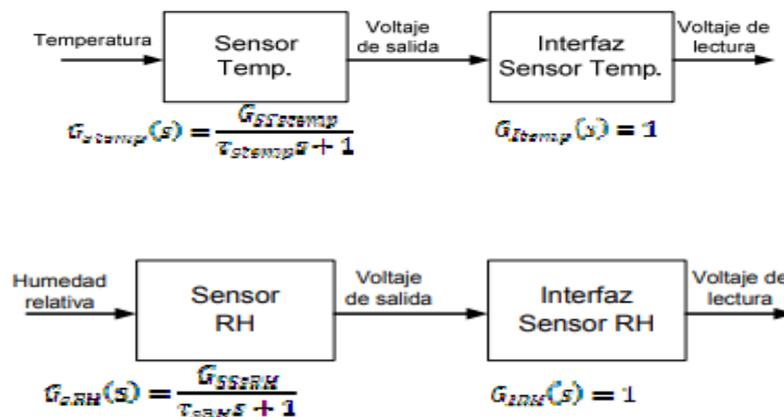


Por lo que, una concentración escala con magnitud 0.2 se le asigna una ganancia en estado estable de 25 y una constante de,  $\tau = 20$ .

$$G_{SCO2}(S) = \frac{25}{20s + 1}$$

## 6.3 Sensor de temperatura y humedad

El sensor de temperatura y humedad “tienen un rango de 0 a 100% de humedad relativa y de -50 a 125 °C de temperatura y ambos en un tiempo de respuesta al 90% de la señal en 15 segundos y una señal de salida de 0 a 5V”.



La ganancia en estado estable del sensor de temperatura corresponde a la ganancia de 5V con relación a la entrada de -50 °C, equivalente a una ganancia  $G_{Stemp} = 0.1$ . Y la ganancia del sensor de

humedad relativa es equivalente a una salida de 5V y una entrada de 0.1 lo que es igual  $G_{SRH} = 50$  . Los sensores tienen una constante de tiempo de 2.3  $\tau = 15$  [s] y  $\tau = 6.5217$

$$G_{stemp}(S) = \frac{0.1}{6.5217s + 1}$$

$$G_{SOD}(S) = \frac{50}{6.5217s + 1}$$

#### 6.4 Sensor de nitrógeno

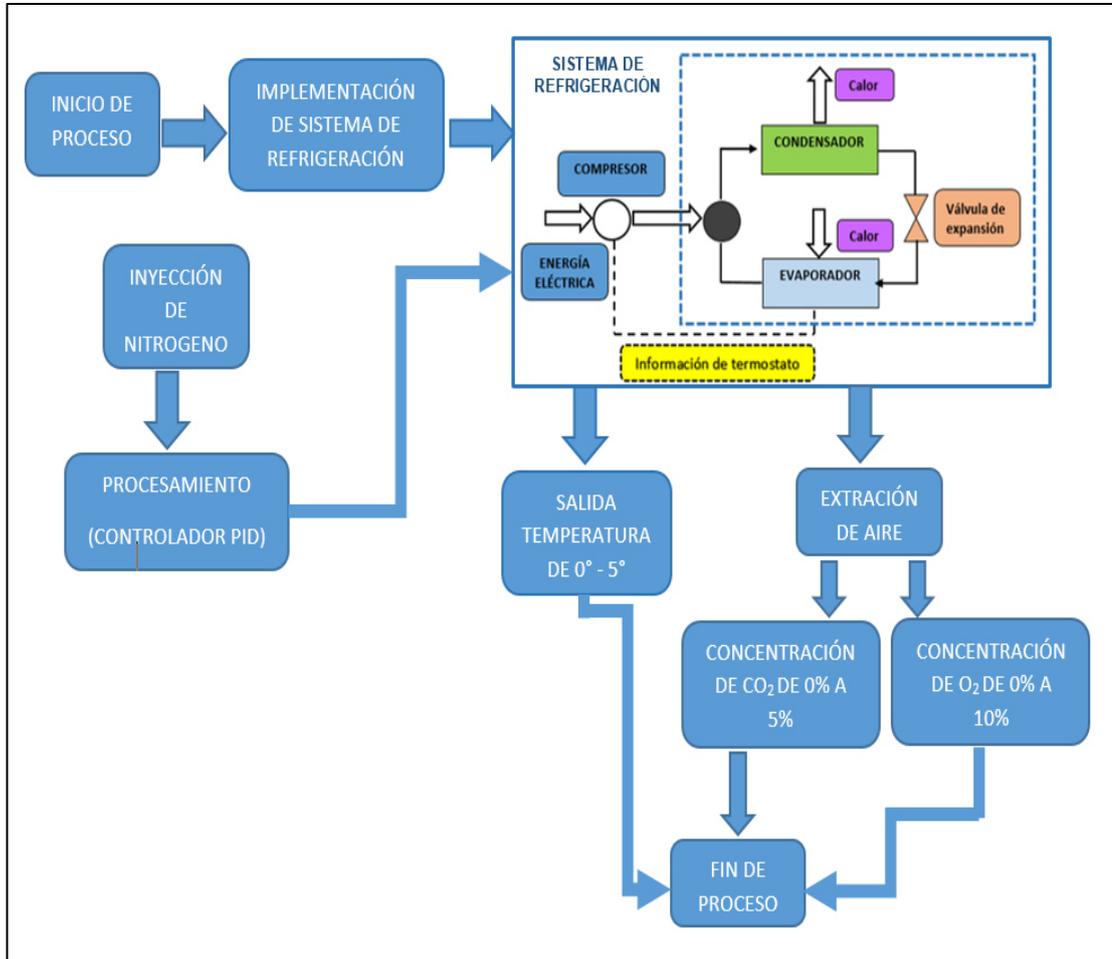
Al igual que en el caso de la válvula, el tiempo de respuesta del sensor es mucho menor que el tiempo de respuesta del proceso, por lo cual se puede modelar al sensor como una ganancia pura  $K_s$ : Donde  $K_s$  corresponde a la ganancia del sensor.

$$H(s) = \frac{D(s)}{C(s)} = K$$

### 3.2 Funcionamiento

**Figura 41**

*Diagrama de bloques del proceso.*

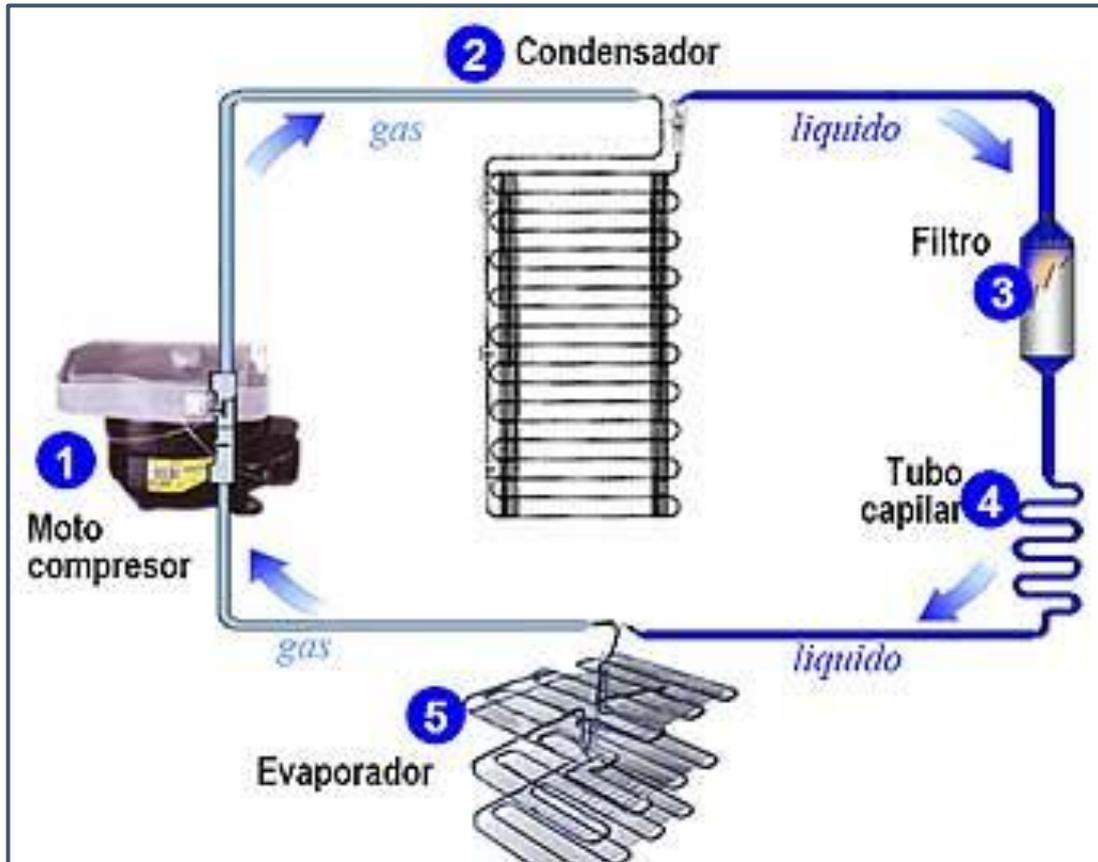


Elaborado por: los autores

**Paso 1:** Diseño de la cámara de refrigeración, esto varía dependiendo el rango de temperatura. A solicitud del cliente de 0 °C -5 °C como se aprecia en la Figura. 42. Partes de un sistema de refrigeración.

**Figura 42**

*Partes de un sistema de refrigeración.*



Elaborado por: los autores

**Paso 2:** Implementación de sensor de temperatura registra el nivel que se tiene dentro de esta cámara, por disposición actual del cliente 0 °C a 5 °C. El sensor nos enviará una señal al tablero de control, se visualizará y modificará la temperatura de seteo. El proceso de propagación de parámetros se detallan en el anexo 2.

**Paso 3:** Diseño de cámara de limpieza. Este nos sirve para inyectar  $N_2$  y reducir nivel de  $O_2$  y  $CO_2$ .

**Paso 4:** Implementación de sensor de  $CO_2$  registra el nivel que se tiene dentro de esta cámara, por disposición actual del cliente 0% a 5%. Con la inyección de nitrógeno se elimina el  $CO_2$ . El sensor nos mandará una señal al tablero de control y se visualizará el porcentaje, para poder inyectar o disminuir  $N_2$ .

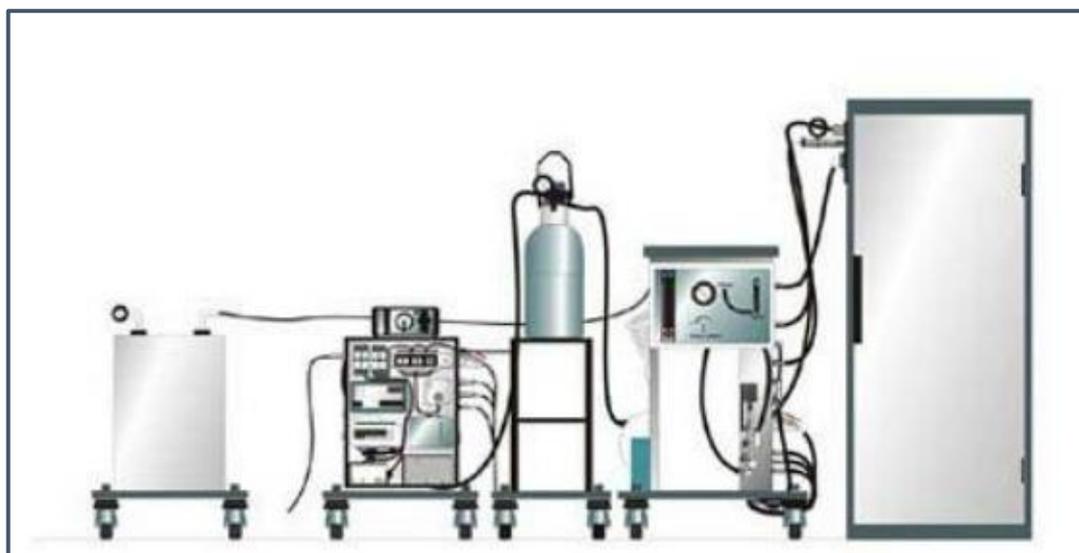
**Paso 5:** El sensor de O<sub>2</sub> registra el nivel que tenemos dentro de esta cámara, por disposición actual del cliente 1% a 10%. El sensor nos enviará una señal al tablero de control e indicamos su valor.

**Paso 6:** Luego esta cámara de limpieza hermetizada enviará aire al recinto de AC la cual ya estará trabajando a la temperatura requerida.

**Paso 7:** El sensor de humedad nos sirve para controlar el rango permitido de cada producto.

### Figura 43

*Distribución de recinto de atmósfera controlada.*



Fuente: Alba, (2020)

## **CAPÍTULO IV.**

### **MODELAMIENTO**

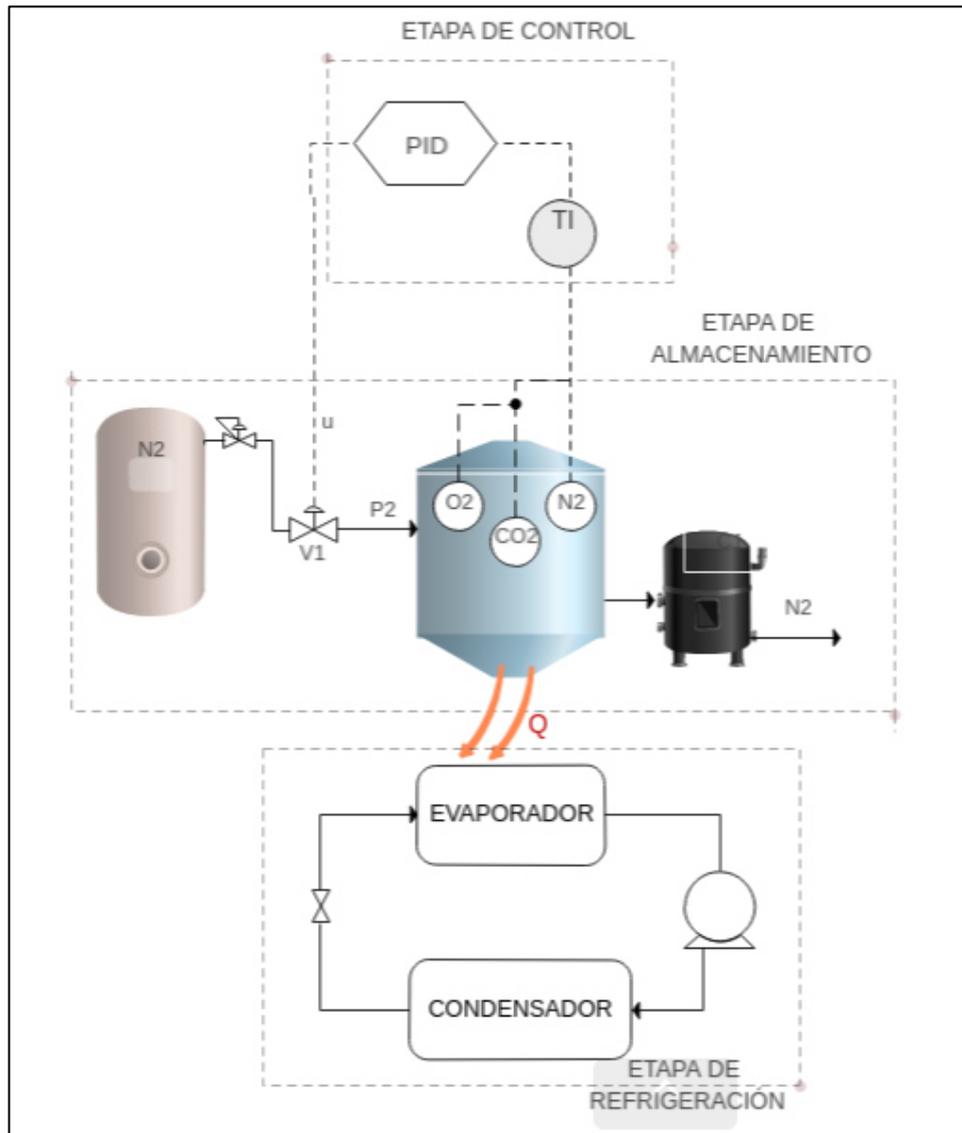
#### 4.1. Modelamiento matemático del prototipo de cámara de atmósfera controlada

En la siguiente Figura. 44 se muestran las etapas de refrigeración, de control y de almacenamiento que componen el prototipo de cámara de atmósfera controlada.

La cámara de atmósfera controlada se representa mediante el diagrama mostrado en la Figura. 45. Donde  $P_1$  es la presión de salida del tanque de  $N_2$ ;  $P_2$  es la presión dentro de la cámara;  $P_0$  es la presión atmosférica; el sensor MQ-135 mide la concentración de nitrógeno y el dispositivo LC – 65 controla la apertura de la válvula V1 mediante la señal U. El dispositivo C1 actúa como bomba de vacío extrayendo el nitrógeno de la cámara hacia el ambiente.

**Figura 44**

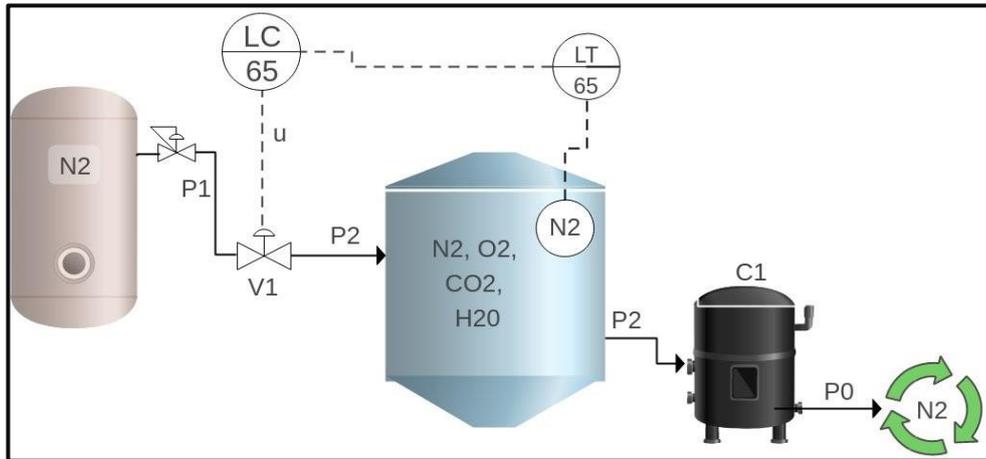
*Diagrama de bloques de los componentes del prototipo.*



Elaborado por: los autores

**Figura 45**

*Planta del sistema de control.*



Elaborado por: los autores

Con respecto al modelamiento del sistema se tienen las siguientes consideraciones:

Los gases involucrados se comportan como ideales debido a las bajas temperaturas y presiones. De acuerdo con ello cumplen la ecuación de los gases ideales.

$$P_2 = RT_2 (N + M) \text{ de la termodinámica} \quad (4.1.1)$$

Para el lazo de control, la señal  $u$  comanda el grado de apertura de la válvula y la variable controlada es la concentración de nitrógeno en la cámara, modelada por la variable  $X_{N_2}$ .

La planta es no lineal, pero se considerará lineal en las cercanías de un estado de equilibrio.

Las variables del proceso se describen en la tabla siguiente Tabla. 12:

**Tabla 12**

*Descripción de las variables del proceso*

Variable	Descripción	Unidades
P1	Presión saliendo del tanque de N <sub>2</sub>	Pa
P2	Presión dentro de la cámara	Pa
P0	Presión atmosférica	Pa
N	Concentración molar de N <sub>2</sub> en la Cámara	moles/m <sup>3</sup>
M	Concentración molar de otros gases	moles/m <sup>3</sup>
T2	Temperatura en la cámara	K
Qi	Flujo volumétrico de entrada	m <sup>3</sup> /s
Qs	Flujo volumétrico de salida	m <sup>3</sup> /s
Ni	Flujo molar de entrada	moles/s
Ns	Flujo molar de salida	moles/s
V	Volumen de la cámara	M <sup>3</sup>

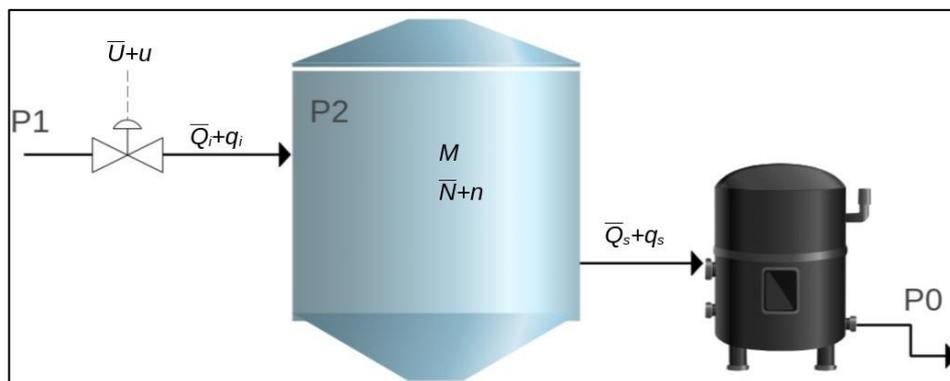
Elaborado por: los autores

**a) Linealización de la planta**

A continuación, se muestra una subsección (etapa de almacenamiento) a partir de la cual se procederá a linealizar el modelo matemático del proceso

**Figura 46**

*Desviación del sistema del estado de equilibrio.*



Elaborado por: los autores

Considerando que la planta se encuentra en un estado de equilibrio cuando las concentraciones de gases permanecen constantes en el tiempo. Cerca de dicho estado de equilibrio Figura. 46, el sistema se

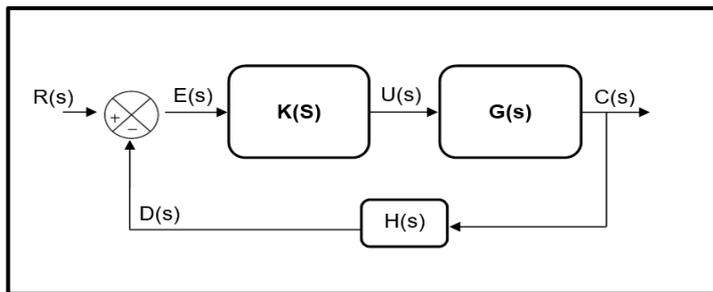
puede considerar lineal. En la Figura. 46 las constantes  $\overline{Q}_i, \overline{Q}_s, \overline{N}, \overline{U}$  representan los valores en equilibrio y las variables  $q_i, q_s, n, u$  las desviaciones entre el valor actual y el equilibrio.

En dicho gráfico  $Q_i, Q_s, N, M, U$  representan el flujo de entrada, el flujo de salida, la concentración molar de nitrógeno, la concentración molar del resto de gases y  $U$  la señal de control respectivamente, como se indica en la Tabla 12.

En la Figura 47. Donde  $R(s)$  es el valor de referencia,  $K(s)$  es el controlador,  $C(s)$  corresponde a la concentración molar de nitrógeno,  $E(s)$  es el error y  $U(s)$  se refiere a la señal de control  $u$  que comanda la válvula V1.

**Figura 47**

*Diagrama de bloques del sistema de control*



Elaborado por: los autores

## b) Modelamiento del flujo de entrada

Considerando que la presión  $P_1$  es mucho mayor que  $P_2$ , la ecuación (4.1.1) describe el flujo a través de una válvula que atraviesa una alta caída de presión (tomada de Jagadeesha T.).

$$Q_i = 0.471 N_2 C_v P_1 \sqrt{\frac{1}{G_g T_1}} \quad (4.1.2)$$

Donde  $N_2, G_g$  son constantes. Además, considerando que la presión y temperatura en 1 no varían, el flujo que ingresa a la cámara solo depende de  $C_v$ , que a su vez depende del grado de apertura de la válvula de manera directamente proporcional (ecuaciones (4.1.3) y

(4.1.4), donde  $C_v$  es  $C_M$  cuando la válvula está totalmente abierta y 0 cuando se cierra).

$$Q_i = K_1 C_v \quad (4.1.3)$$

$$C_v = C_M A_v \quad (4.1.4)$$

También, el tiempo de respuesta de la válvula es mucho menor que la respuesta de la planta, por lo que la apertura  $A_v$  es directamente proporcional a la señal  $U$  e igual a  $U$  dividido por el valor máximo de la señal ( $V$ ). En la ecuación (4.1.5) se muestra la relación entre el flujo y la señal de control.

$$Q_i = \frac{K_1 C_M}{V} U \quad (4.1.5)$$

Por la ecuación de los gases ideales (4.1.1), el flujo molar se relaciona con la señal de control según (4.1.6); así mismo, el flujo molar de entrada se puede expresar en función de la concentración molar en la cámara y la señal de control (4.1.7).

$$N_i = Q_i \frac{P_2}{RT} = \frac{K_1 C_M P_2}{V RT} U \quad (4.1.6)$$

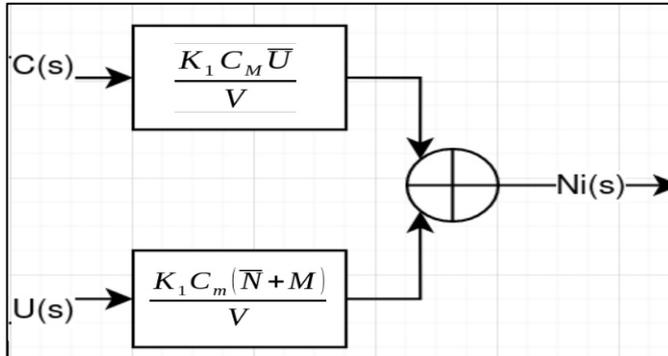
$$N_i = \frac{K_1 C_M}{V} (N + M) U \quad (4.1.7)$$

La variación del flujo molar de entrada  $\dot{n}_i$  se determina de manera directa (4.1.8) y está representada por la siguiente ecuación lineal de primer orden:

$$\dot{n}_i = \frac{K_1 C_M \bar{U}}{V} n + \frac{K_1 C_M (\bar{N} + M)}{V} u \quad (4.1.8)$$

**Figura 48**

Diagrama de bloques del flujo de entrada. Donde  $N_i$  corresponde al flujo de entrada.



Elaborado por: los autores

**c) Modelamiento del flujo de salida**

Considerando que el compresor  $C_1$  extrae cierto volumen por minuto de manera constante (*free air delivery = FAD*), dicho volumen es igual al flujo de salida (4.1.9). A partir de la ecuación del gas ideal, se tiene el flujo molar de salida (4.1.10), y el flujo molar en función de la concentración molar (4.1.11).

$$Q_s = FAD \quad (4.1.9)$$

$$\dot{N}_s = Q_s \frac{P_2}{RT} = FAD \left( \frac{P_2}{RT} \right) \quad (4.1.10)$$

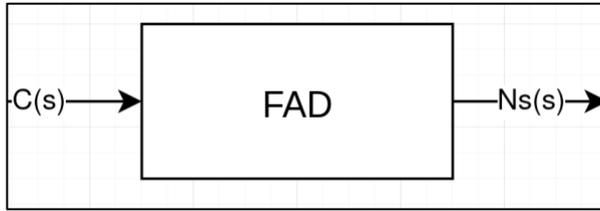
$$\dot{N}_s = FAD(N + M) \quad (4.1.11)$$

Se puede derivar directamente la desviación del flujo molar de salida en función de la desviación de la concentración molar (4.1.12).

$$\dot{n}_s = FAD n \quad (4.1.12)$$

**Figura 49**

Diagrama de bloques del flujo de salida. Donde  $N_s$  corresponde al flujo de salida.



Elaborado por: los autores

**d) Función de transferencia de la planta  $G(s)$**

La velocidad de cambio de la concentración molar en la cámara se obtiene restando los flujos de entrada y salida (4.1.13). Así mismo, la desviación en el cambio de la concentración molar se halla directamente (4.1.14).

$$\forall \dot{N} = \dot{N}_l - \dot{N}_s \quad (4.1.13)$$

$$\dot{n} = \frac{\dot{n}_l - \dot{n}_s}{V} \quad (4.1.14)$$

Reemplazando (4.1.8) y (4.1.9) en (4.1.14) se obtiene la ecuación (4.1.15).

$$\dot{n} = \frac{K_1 C_M \bar{U}}{\forall V} n + \frac{K_1 C_m (N+M)}{\forall V} u - \frac{FAD}{V} n \quad (4.1.15)$$

A partir de dicha ecuación, se aplica la transformada de Laplace, tomando en consideración que  $\mathcal{L}(n(t)) = C(s)$ ,  $\mathcal{L}(u(t)) = U(s)$ .

$$sC(s) = \left( \frac{K_1 C_M \bar{U}}{\forall V} - \frac{FAD}{V} \right) C(s) + \frac{K_1 C_m (N+M)}{\forall V} U(s)$$

Quedando la función de transferencia de la planta, cámara de atmosfera controlada (4.1.16)

$$G(s) = \frac{C(s)}{U(s)} = \frac{\frac{K_1 C_M (\bar{N} + M)}{\forall V}}{s + \frac{V FAD - K_1 C_M \bar{U}}{\forall V}} \quad (4.1.16)$$

**Tabla 13**

*Parámetros del proceso*

Parámetro	Valor
$K_1$	16.6E-3
$C_M$	0.5
$\bar{U}$	2.5 V
$\forall$	5 V
$\bar{N} + M$	22.2 moles/m <sup>3</sup>
FAD	3 E-5 m <sup>3</sup> /s
$\forall$	0.25 m <sup>3</sup>

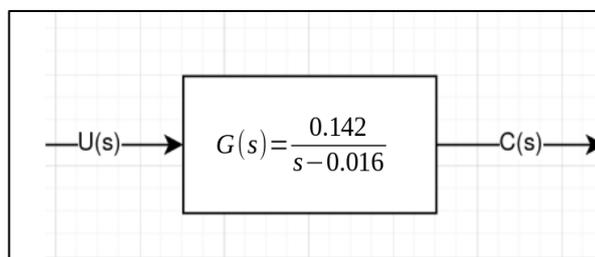
Elaborado por: los autores

Considerando los parámetros del proceso definidos en la Tabla. 15, la ecuación de transferencia resultaría (4.1.17). Si se requiere un modelamiento más preciso, sería necesario una identificación de parámetros a partir de la respuesta del sistema.

$$G(s) = \frac{0.142}{s - 0.016} \quad (4.1.17)$$

**Figura 50**

*Diagrama de bloques de la planta*



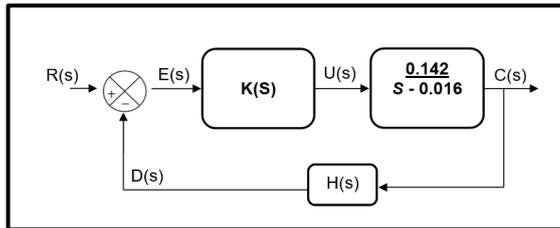
Elaborado por: los autores

Se estima que la ganancia del sistema de control linealizado es de 0.142 V por cada mol/m<sup>3</sup>; y la constante de tiempo del modelo es de 60s.

Y el diagrama se muestra a continuación:

**Figura 51**

*Diagrama de bloques del sistema de control de lazo cerrado*



Elaborado por: los autores

## 4.2 Modelamiento de los sensores

### a) Sensor de oxígeno

El sensor de oxígeno disuelto necesita un tiempo de 15 segundos para alcanzar 95% de la lectura final y además la relación entre la salida de voltaje y la concentración de O<sub>2</sub> medida se indica en la Tabla 18 extraída de la prueba y validación del sensor.

Tabla 18. Valores del sensor de oxígeno

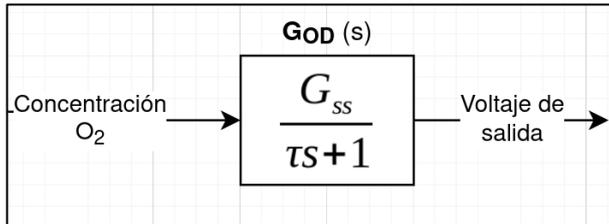
Medición del sensor (V)	Concentración de O <sub>2</sub>
1.7	21.1
1.68	20.8
1.45	18
1.41	17.5
1.51	18.7
1.52	18.8

Elaborado por: los autores

Luego, mediante una regresión lineal hallamos que la ganancia en estado estable del sensor de oxígeno es 0.08 V/%.

**Figura 52**

*Diagrama de bloques del sensor de oxígeno*



Elaborado por: los autores

Como el tiempo de respuesta  $3\tau$  (95%) = 15 [s], se tienen una  $\tau = 5$ . Por ello, la función de transferencia del sensor de oxígeno disuelto es:

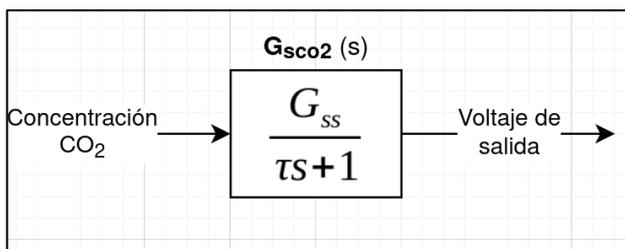
$$G_{OD}(S) = \frac{G_{SS}}{\tau s + 1} = \frac{0.08}{5s + 1}$$

**b) Sensor de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)**

Para el sensor de dióxido de carbono CO<sub>2</sub>, se sabe que el 95% de la señal de salida se alcanza en 120 segundos y tenemos un valor de 5V para una concentración del 0.5%. Por lo que la ganancia en estado estable sería  $G_{SS} = \frac{5V}{0.5\%} = 10 \frac{V}{\%}$ ; y la constante de tiempo,  $\tau = 120/3 = 40$ .

**Figura 53**

*Diagrama de bloques del sensor de CO<sub>2</sub>*



Elaborado por: los autores

La función de transferencia del sensor de CO<sub>2</sub> es:

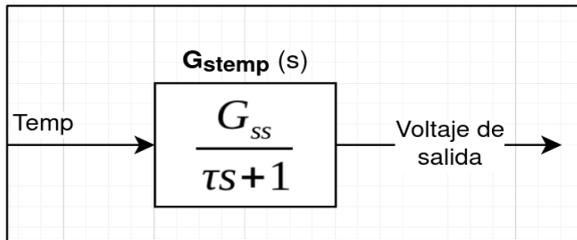
$$G_{SCO2}(S) = \frac{G_{SS}}{\tau s + 1} = \frac{10}{40s + 1}$$

### c) Sensor de temperatura y humedad

El sensor de temperatura y humedad tienen un rango de 0 a 100% de humedad relativa y de -50 a 125 °C de temperatura y ambos en un tiempo de respuesta al 90% de la señal en 15 segundos y una señal de salida de 0 a 5V.

**Figura 54**

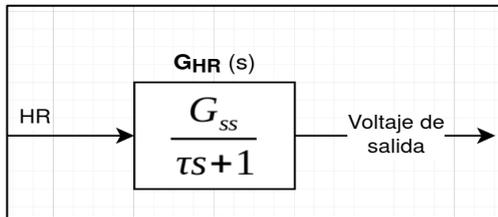
*Diagrama de bloques del sensor de temperatura*



Elaborado por: los autores

**Figura 55**

*Diagrama de bloques del sensor de HR*



Elaborado por: los autores

La ganancia en estado estable del sensor de temperatura se calcula  $G_{ss} = \frac{5V}{175C} = 0.029 V/C$ . Y la ganancia del sensor de humedad relativa es igual a  $G_{ss} = \frac{5V}{100\%} = 0.05 \frac{V}{\%}$ . Los dos sensores tienen una constante de tiempo de 2.3  $\tau = 15$  segundos; es decir  $\tau = 6.5217$ .

Por lo tanto, las funciones de transferencia de los sensores de temperatura y humedad se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$G_{stemp}(S) = \frac{0.029}{6.5217s + 1}$$

$$G_{SHR}(S) = \frac{0.05}{6.5217s + 1}$$

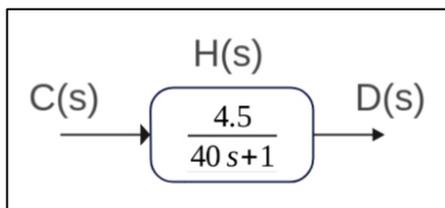
**d) Modelamiento del sensor de nitrógeno.**

Tomando en consideración que la medición de nitrógeno se efectuará a partir de las mediciones de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, la constante de tiempo será igual a la del sensor de oxígeno  $\tau = 40$ . Además, considerando que una concentración de 100% (D(s)) corresponde a 22.2 moles/m<sup>3</sup> (C(s)), la ganancia del sensor es 4.5 moles/%m<sup>3</sup>. Por lo tanto, la función de transferencia del sensor de nitrógeno se muestra en la siguiente ecuación:

$$G_{N_2}(S) = \frac{G_{ss}}{\tau s + 1} = \frac{4.5}{40s + 1}$$

**Figura 56**

*Diagrama de bloques del sensor de nitrógeno*



Elaborado por: los autores

**e) Diseño del controlador**

La función de transferencia del sistema de control en lazo abierto es descrita en la ecuación (4.1.19). Dicho lazo abierto se observa en la Figura. 57.

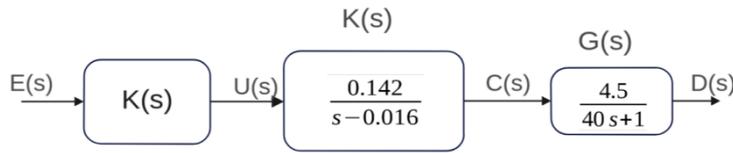
$$L(s) = K(s)G(s)H(s) = K(s) \frac{0.142}{s-0.016} \quad (4.1.19)$$

Como G(s) (ecuación (4.1.17)) y H(s) (ecuación (4.1.18)) ya han sido hallados, la función de transferencia en lazo abierto L(s) es

$$L(s) = K(s)G(s) = \frac{7.1s^2 + 0.71s + 0.02}{s^2 - 0.016s}$$

**Figura 57**

*Lazo abierto del sistema de control*



Elaborado por: los autores

Se asume que el compensador  $K(s)$ . Su función de transferencia se muestra a continuación en la ecuación (4.1.20).

$$K(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (4.1.20)$$

**f) Especificaciones de diseño**

Se tienen como especificaciones de diseño que el porcentaje de sobre impulso sea menor al 5%. El porcentaje de sobre impulso y el tiempo de asentamiento se relacionan con los parámetros  $\omega_n$  y  $\zeta$  según la ecuación (4.1.21).

$$M_p = \exp\left(\frac{-\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right) = 0.05$$

$$t_s = \frac{4}{\zeta\omega_n} = 120 \quad (4.1.21)$$

A partir de las especificaciones, han de ser:

$$p_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{1-\zeta^2}j = -0.033 \pm 0.011j \quad (4.1.22)$$

Según Wang et.al., la función de transferencia en lazo cerrado es:

$$H(s) = \frac{K(s)G(s)}{1+K(s)G(s)H(s)} = \frac{N(s)(K_D s^2 + K_p s + K_I)}{D(s)s + N(s)(K_D s^2 + K_p s + K_I)} \quad (4.1.23)$$

Donde  $N(s)$  y  $D(s)$  son el denominador y numerador de la función de la planta:

$$N(s) = 0.639 D(s) = 40s^2 + 0.36s - 0.016 \quad (4.1.24)$$

Luego, para que los polos de  $H(s)$  sean  $-0.033 \pm 0.011j$ , los valores de  $K_D$  y  $K_I$  deben ser:

$$K_I = \frac{a^2 + b^2}{2a} K_P - (a^2 + b^2) X_1$$

$$K_D = \frac{1}{2a} K_P + X_2$$

$$p_1 = -a + bj = -0.033 + 0.011j$$

Donde  $X_1$  y  $X_2$  se hallan:

$$X_1 = \frac{1}{2b} \Im \left[ \frac{-1}{G(p_1)} \right] + \frac{1}{2a} \Re \left[ \frac{-1}{G(p_1)} \right] = 0.491 \quad (4.1.25a)$$

$$X_2 = \frac{1}{2b} \Im \left[ \frac{-1}{G(p_1)} \right] - \frac{1}{2a} \Re \left[ \frac{-1}{G(p_1)} \right] = -0.637 \quad (4.1.25b)$$

Luego, las constantes proporcional y derivativa se calculan:

$$K_D = 15K_P + 0.637 \quad K_I = 0.0185K_P - 6.1e - 4 \quad (4.1.26)$$

Según el mismo artículo (Wang et. al.), la ecuación característica es la siguiente:

$$K_p \bar{G}(s) = -1 \quad (4.1.27a)$$

$$K_p \frac{N(s)(s^2 + 2as + (a^2 + b^2))}{2a(D(s)s + X_2 N(s)s^2 - (a^2 + b^2)X_1 N(s))} = -1 \quad (4.1.27b)$$

Reemplazando los valores (ecuaciones 4.1.24 y 4.1.25) en 4.1.27b:

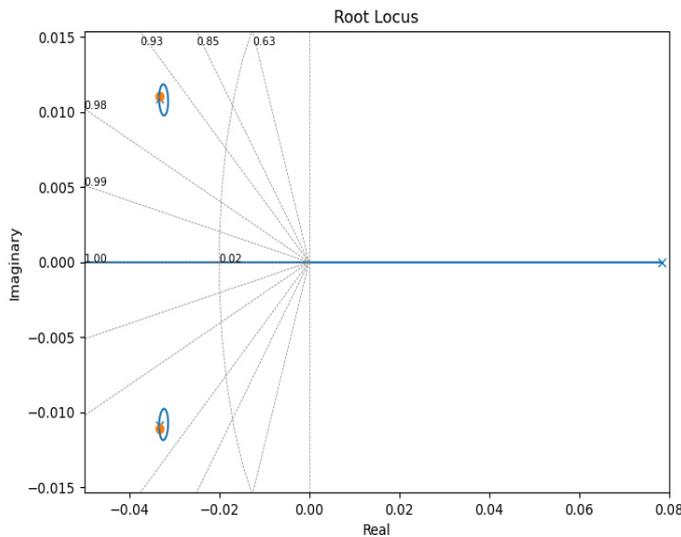
$$K_p \frac{0.639s^2 + 0.0426s + 7.9e-4}{0.267s^3 - 0.0032s^2 - 0.0011s - 2.6e-5} = -1 \quad (4.1.28)$$

### g) Lugar de las raíces

A partir de dicha ecuación (4.1.26), se grafica el lugar geométrico de las raíces en la siguiente figura. El lugar de las raíces describe la trayectoria de los polos en lazo cerrado para  $K_p \in [0, \infty]$ .

**Figura 58**

*Lugar de las raíces*



Elaborado por: los autores

Donde los ceros y polos de la función de transferencia  $\bar{G}(s)$  (4.1.26a):

Ceros:  $[-0.033 + 0.011j, -0.033 - 0.011j]$

Polos:  $[0.079, -0.034 + 0.0096j, -0.034 - 0.0096j]$

En la tabla 14 se indica el valor de los polos para distintos valores de  $K_p$ .

**Tabla 14**

*Distintos puntos en el lugar de las raíces*

$K_p$	Polos
0.01	$0.0546, -0.0333 \pm 0.0108j$
0.025	$0.0186, -0.0333 \pm 0.0106j$
0.0327	$0, -0.0332 \pm 0.0104j$
0.05	$-0.0436, -0.0321 \pm 0.012j$
0.07	$-0.0893, -0.0332 \pm 0.0114j$
0.1	$-0.161, -0.0333 \pm 0.0112j$

Elaborado por: los autores

Se observa que la raíces son imaginarias puras para  $K_p = 0.0327$ . Es decir, el sistema en lazo cerrado es estable para  $K_p > 0.327$ .

#### h) Punto de ruptura.

Para hallar el punto de ruptura y la ganancia correspondiente se despeja  $K_p$  y se deriva e iguala a 0, de la ecuación (4.1.25).

$$K_p = \frac{-7s^2 + 0.4s}{10s^2 + s + 0.0278}$$

$$\frac{dK_p}{ds} = 0$$

$$11s^2 + 0.389s - 0.011 = 0 \quad (4.1.25)$$

Hallando raíces de la ecuación (4.1.26):

$$s_1 = -0.054 \quad s_2 = 0.0187 \quad (4.1.26)$$

Como  $s_1$  no pertenece al lugar de las raíces,  $s_2$  es el punto de ruptura o breakpoint.

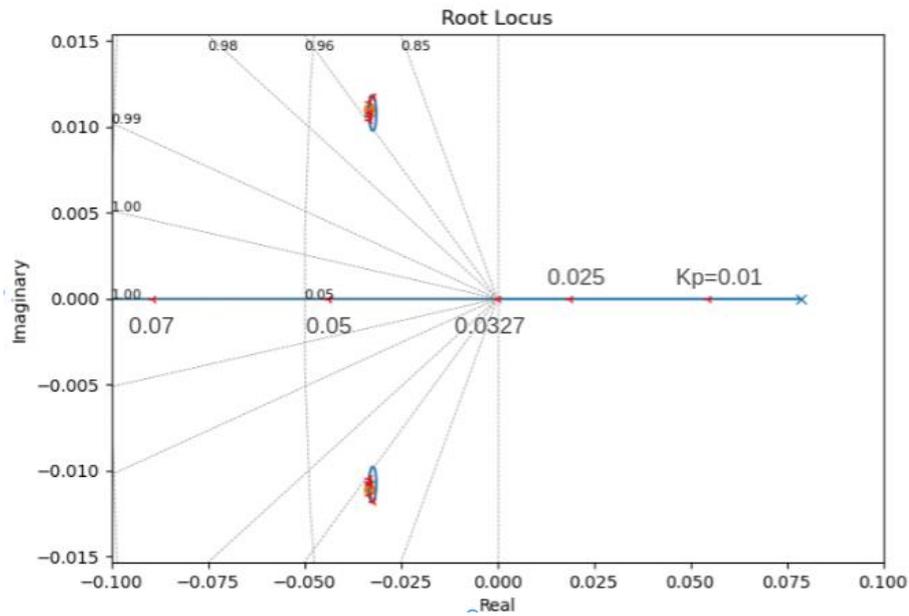
$$s = 0.0187 \quad K_p = 0.1 \quad (4.1.27)$$

#### i) Diseño final del Controlador

Con la información anterior, tenemos una gráfica más detallada del lugar de las raíces (Figura. 59 y 60) a partir de la cual escogemos una ganancia  $K_p = 0.05$  por ser lo suficientemente cercana a las especificaciones de diseño, especialmente en el tiempo de asentamiento.

**Figura 59**

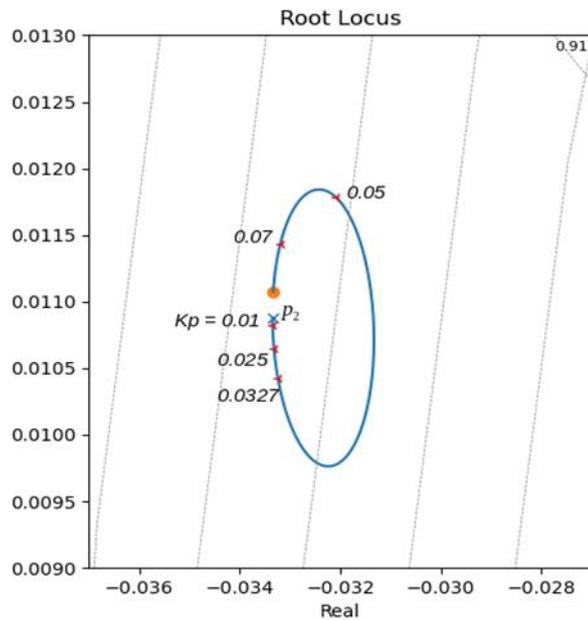
*Lugar de las raíces (a)*



Elaborado por: los autores

**Figura 60**

*Lugar de las raíces (b)*



Elaborado por: los autores

Luego, los polos en lazo cerrado serán:

$$p_1 = -0.0436, \quad p_{2,3} = -0.0321 \pm 0.0118j$$

Considerando que los polos y ceros con parte imaginaria ( $p_{2,3}$ ) se cancelan, la constante de tiempo sería igual a:

$$\tau = \frac{-1}{p_1} = 22.9$$

Y el tiempo de asentamiento al 98%:

$$t_s = 4\tau = 91.6s$$

Por lo que el controlador PID diseñado satisface los requerimientos del lazo cerrado ( $t_s < 120$ , ecuación (4.1.28b)).

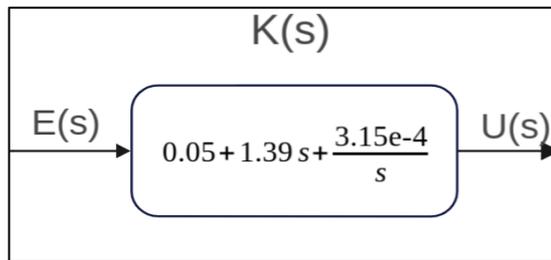
La función es la siguiente:

$$K(s) = 0.05 + 1.39s + \frac{3.15e-4}{s}$$

$$K_p = 0.05 \quad K_D = 1.39 \quad K_I = 3.15e-4$$

### Figura 61

Diagrama de bloques del controlador PID



Elaborado por: los autores

La función es:

$$H(s) = \frac{K(s)G(s)}{1+K(s)G(s)} = \frac{50s^2+5s+0.14}{57.04s^2+4.58s+0.14} \quad (4.1.28)$$

### j) Análisis de estabilidad

Como los polos del lazo cerrado  $p_{1,2,3} = -0.0436, -0.0321 \pm 0.0118j$  tienen parte real negativa, se concluye que el sistema es estable.

Además, observando el lugar de las raíces, el sistema es estable si la ganancia proporcional del controlador se encuentra en el rango  $K_p \in [0.327, \infty]$ .

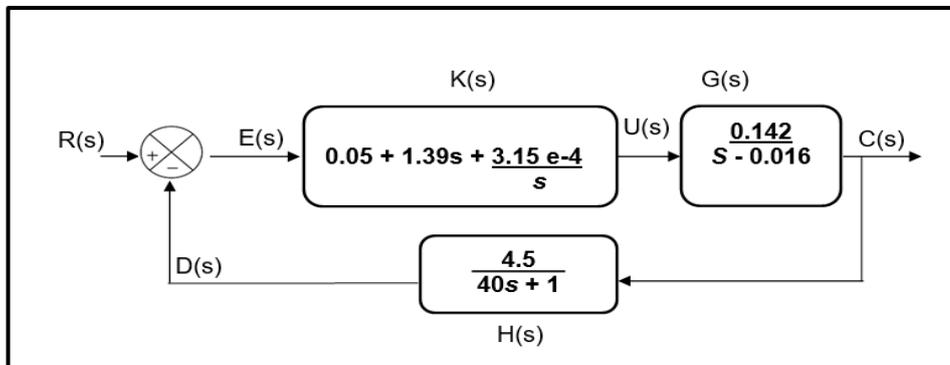
La función es:

$$H(s) = \frac{K(s)G(s)}{1+K(s)G(s)H(s)} = \frac{78.9s^3+0.48s^2+0.0089s+4.5e-5}{40s^3+1.25s^2+0.016s+2e-4}$$

De esta manera el diagrama de bloques para este diseño se visualiza

**Figura 62**

*Diagrama de bloques del lazo cerrado*

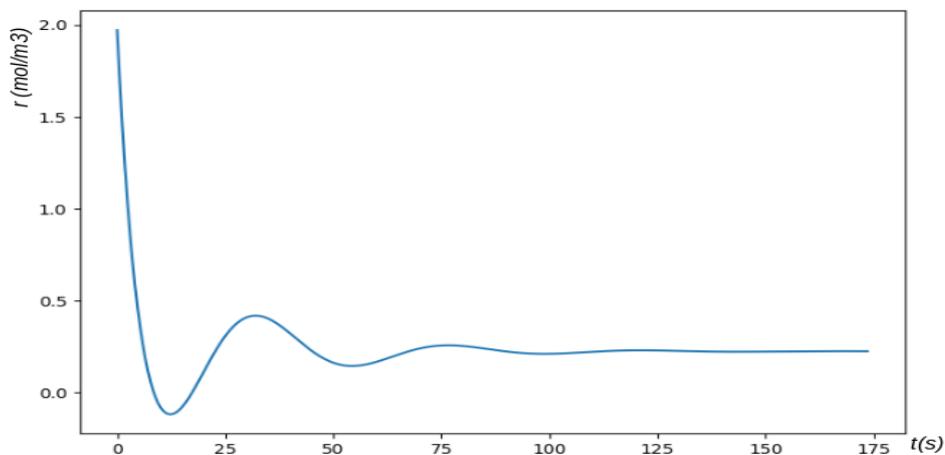


Elaborado por: los autores

Asimismo, la respuesta se muestra en la siguiente Figura. 63:

**Figura 63**

*Respuesta al escalón unitario*



Elaborado por: los autores

**Tabla 15**  
**Resumen de parámetros del proceso**

N	VARIABLE	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
1	CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono	
2	O <sub>2</sub>	Oxígeno	
3	N <sub>2</sub>	Nitrógeno	
4	J	Inercia	
5	B	Fricción	
6	T	Torque o función forzada de la ecuación diferencial	
7	K	Ganancia	
8	η	Atenuación	
9	ω <sub>n</sub>	Frecuencia natural no amortiguada	
10	ζ	Factor de amortiguamiento relativo del sistema	
11	ω <sub>d</sub>	Frecuencia natural amortiguada	
12	T <sub>max</sub>	Tiempo pico	
13	M <sub>p</sub>	Sobrepaso máximo	
14	T <sub>s</sub>	Tiempo de asentamiento	
15	m <sub>p</sub>	Sobrepaso Máximo	
16	t <sub>s</sub>	Tiempo de asentamiento	
17	t <sub>r</sub>	Tiempo de levantamiento	
18	t <sub>p</sub>	Tiempo pico	
19	t <sub>d</sub>	Tiempo de retardo	
20	K <sub>p</sub>	Es la constante de ganancia proporcional	
21	e(t)	Es el error	
22	T <sub>i</sub>	Es el tiempo integral	
23	T <sub>d</sub>	Es el tiempo derivativo	
24	P1	Presión saliendo del tanque de N <sub>2</sub>	Pa
25	P2	Presión dentro de la cámara	Pa
26	P0	Presión atmosférica	Pa
27	N	Concentración molar de N <sub>2</sub> en la cámara	moles/m <sup>3</sup>
28	M	Concentración molar de otros gases	moles/m <sup>3</sup>
29	T2	Temperatura en la cámara	K
30	Q <sub>i</sub>	Flujo volumétrico de entrada	m <sup>3</sup> /s
31	Q <sub>s</sub>	Flujo volumétrico de salida	m <sup>3</sup> /s
32	N <sub>i</sub>	Flujo molar de entrada	moles/s
33	N <sub>s</sub>	Flujo molar de salida	moles/s
34	V	Volumen de la Cámara	m <sup>3</sup>
35	U	Señal de control	V
36	V	Valor máximo de la señal de control	V
37	N	N en equilibrio	moles/m <sup>3</sup>
38	$\overline{Q_i}$	Qi en equilibrio	m <sup>3</sup> /s
39	$\overline{Q_s}$	Qs en equilibrio	m <sup>3</sup> /s
40	$\overline{N_i}$	Ni en equilibrio	moles/s
41	$\overline{N_s}$	Ns en equilibrio	moles/s
42	$\overline{N_s}$	U en equilibrio	V
43	n	Variación de la variable N	moles/m <sup>3</sup>
44	q <sub>i</sub>	Variación de la variable Qi	m <sup>3</sup> /s
45	q <sub>s</sub>	Variación de la variable Qs	m <sup>3</sup> /s
46	n <sub>i</sub>	Variación de la variable Ni	moles/s
47	n <sub>s</sub>	Variación de la variable Ns	moles/s
48	u	Variación de la variable U	V

Elaborado por: los autores

## **CAPÍTULO V. PRUEBAS Y RESULTADOS**

### 5.1 Sensor de CO<sub>2</sub> MH-Z19C

#### **a) Principio de operación**

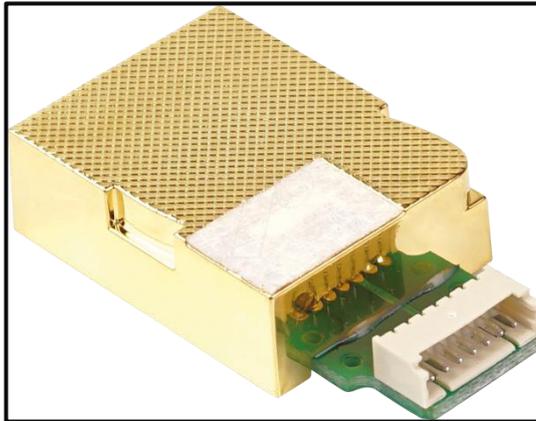
MH-Z19C NDIR es un sensor que detecta la presencia de CO<sub>2</sub> en el aire mediante el principio de absorción de infrarrojo no dispersiva (NDIR). Este principio consiste en que gases como el CO<sub>2</sub> absorben la radiación a una determinada longitud de onda, generalmente infrarroja. Cuenta con una interfaz de salida PWM y una interfaz de salida UART, parámetros de calibración (Anexo 3).

Algunos parámetros del sensor:

Gas detectado	CO <sub>2</sub>
Voltaje de alimentación	5.0 VDC
Corriente media	<40 Ma
Corriente pico	125 Ma
Rango de detección	400 a 5000 ppm
Temperatura de operación	-10 C a 50 C
Tiempo de respuesta	<120s
Interfaces de salida	UART (TTL a 3.3V); PWM

**Figura 64**

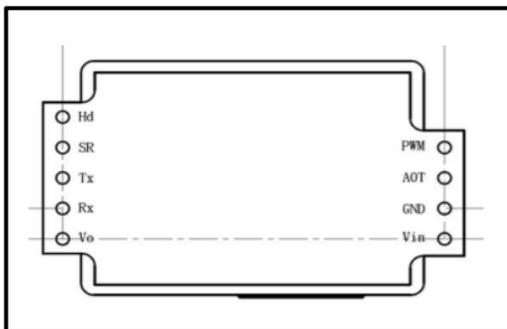
*Sensor MH-Z19C*



Elaborado por: los autores

**Figura 65**

Pines del sensor MH-Z19C.



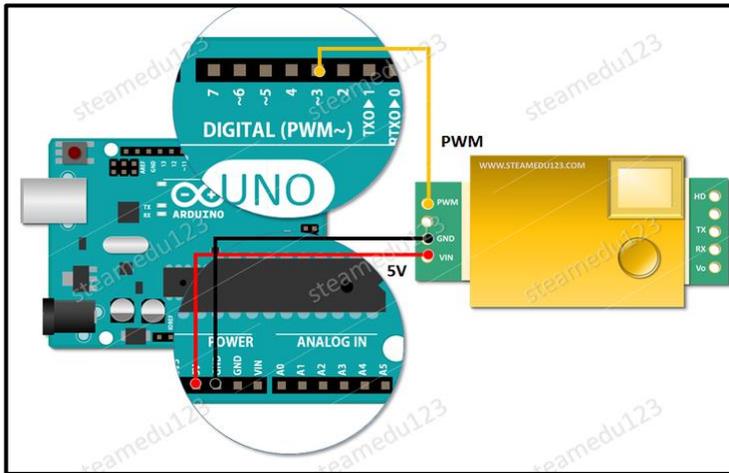
*Nota.* Rx, Tx corresponden a interfaz UART. PWM a la salida analógica. Vin y GND a la alimentación de 5V y tierra. Elaborado por: los autores

**b) Acondicionamiento y procesamiento**

El esquemático de conexión entre el sensor MH-Z19C y el controlador Arduino:

**Figura 66**

*Conexión entre arduino y sensor de CO2*



Fuente: Alba, (2020)

**c) Resultados de calibración**

Datos de la prueba:

Nombre de la prueba	Calibración del sensor de CO <sub>2</sub>
Fecha y lugar de la prueba	10 de noviembre del 2021. La Molina, Lima.
Variable a calibrar	Concentración del CO <sub>2</sub>

Evidencias de la prueba:

**Figura 67**

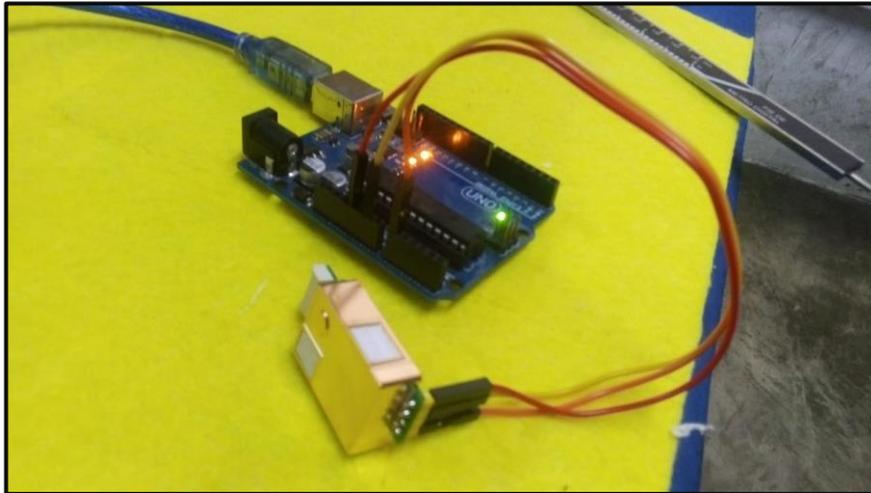
*Mediciones del sensor MH-Z19C*

```
 /dev/ttyACM0
dc:666 voltaje:3.26
dc:665 voltaje:3.25
dc:665 voltaje:3.25
dc:665 voltaje:3.25
dc:665 voltaje:3.25
dc:664 voltaje:3.25
dc:665 voltaje:3.25
```

Fuente: Elaboración de los autores

**Figura 68**

*Sensor MH-Z19C conectado a Arduino.*



Elaborado por: los autores

Resultados de calibración:

Se mide la concentración de CO<sub>2</sub> en el medio ambiente en primer lugar y luego la concentración en un recipiente cerrado lleno de aliento humano.

Condición atmosférica	Medición en V	Concentración de CO <sub>2</sub> en ppm
Aire libre de CO <sub>2</sub>	0.33	330 ppm
Recipiente lleno de aliento	3.26	3260 ppm

La concentración de CO<sub>2</sub> se obtiene a partir del voltaje gracias a la siguiente fórmula:

$$C = V * 1000$$

Donde C: concentración en ppm y V: voltaje en voltios.

## 5.2 Sensor de temperatura DS18B20

### a) Principio de operación

El sensor DS18B20 es un termómetro digital de alta precisión (entre 9 y 12 bits); su temperatura operativa se encuentra entre -50 y 125 °C. Cuenta con una sola línea como interfaz de comunicación bidireccional y

no requiere mayor acondicionamiento previo, parámetros de calibración (Anexo 3).

Parámetros de operación:

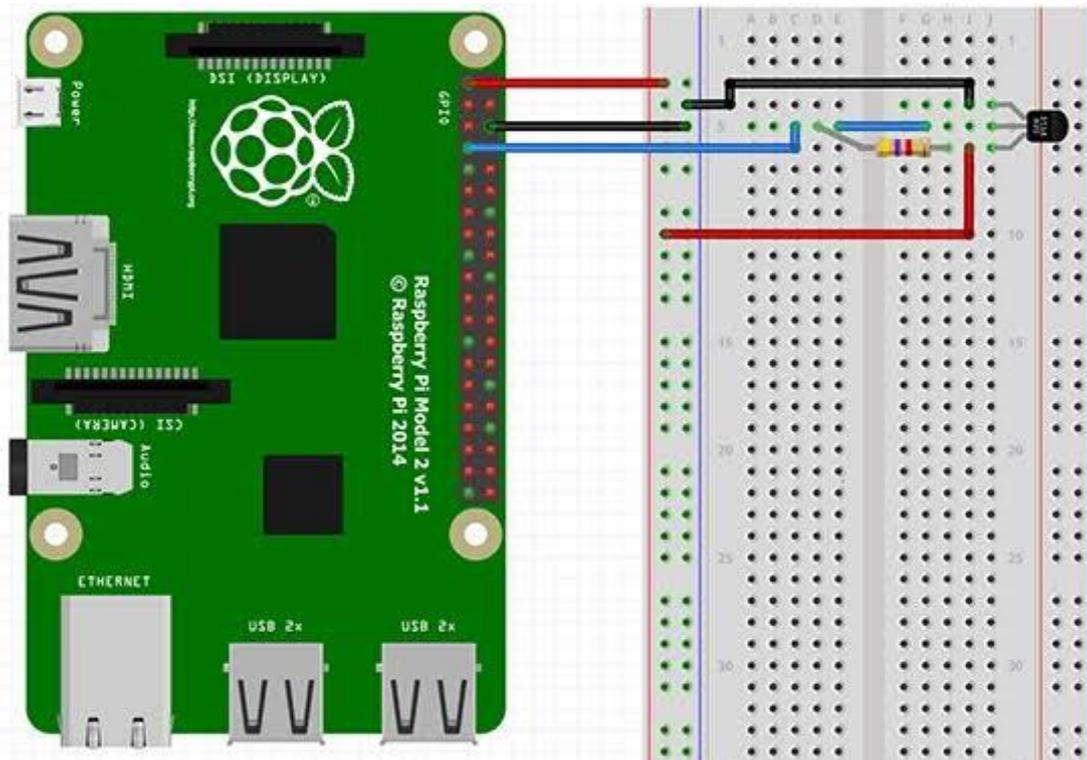
Rango de medición	de -50 a 125 °C
Precisión	±0.5 °C en el rango (-10 °C; 85 °C)
Alimentación	3.0 a 5.5V
Comunicación	Serial por pin Data

### b) Acondicionamiento y procesamiento

El sensor se comunicará con el controlador Raspberry Pi según las siguientes conexiones, donde el cable rojo se conecta a Vcc, el negro a GND y el azul al pin GPIO4:

**Figura 69**

*Conexión entre RPI y sensor de temperatura*



Fuente: Elaboración de los autores

### c) Resultados de la prueba

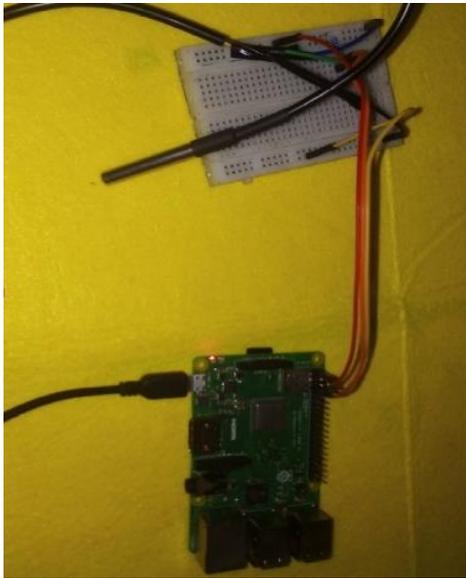
Datos de la prueba:

Nombre de la prueba	Calibración del sensor de temperatura
Fecha y lugar de la prueba	10 de noviembre del 2021. La Molina, Lima.
Variable a calibrar	Temperatura de agua

Evidencias de la prueba:

#### Figura 70

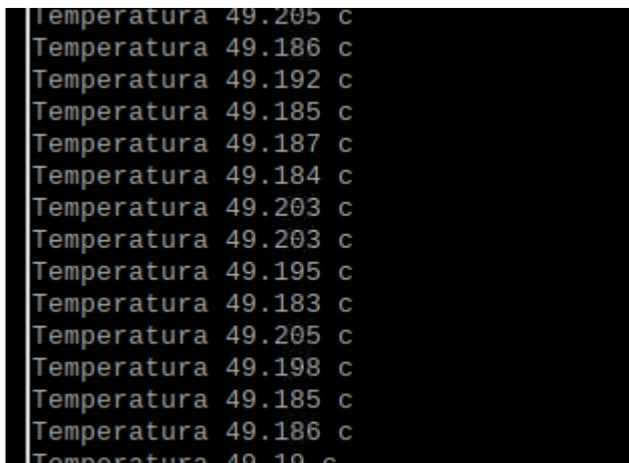
*Conexión entre RPI y sensor.*



Elaborado por: los autores

#### Figura 71

*Mediciones del sensor.*



Elaborado por: los autores

Resultados de calibración: Se hirvió un poco de agua y se midió su temperatura con un termómetro digital y con el sensor DS18B20 a medida que se iba enfriando. Los resultados se muestran en la siguiente Tabla. 16.

**Tabla 16**

*Valores del sensor de temperatura*

Medición del sensor	Medición patrón	Error (C)	Error relativo (%)
88.14	90	1.86	2.1
71.44	70	1.44	2.1
48.64	50	1.36	2.7
28.34	30	1.66	5.5
8.82	10	1.18	11.8

Fuente: Elaboración de los autores

Se observa un error de medición en torno a 1.5 C; con el error relativo siendo mayor para temperaturas bajas y menor para temperaturas elevadas.

### 5.3 Sensor de calidad del aire MQ-135

#### a) Principio de operación

El sensor MQ-135 permite medir la calidad del aire para detectar el grado de contaminación atmosférica. Por lo general se emplea prevenir altos niveles de contaminación, en los alrededores de industrias, etc. Opera detectando la concentración de gases contaminantes como el CO<sub>2</sub>, amoniaco, nitratos de carbono, etc. Cuenta con salida digital TTL y análoga. Parámetros de calibración (Anexo 3).

Especificaciones técnicas:

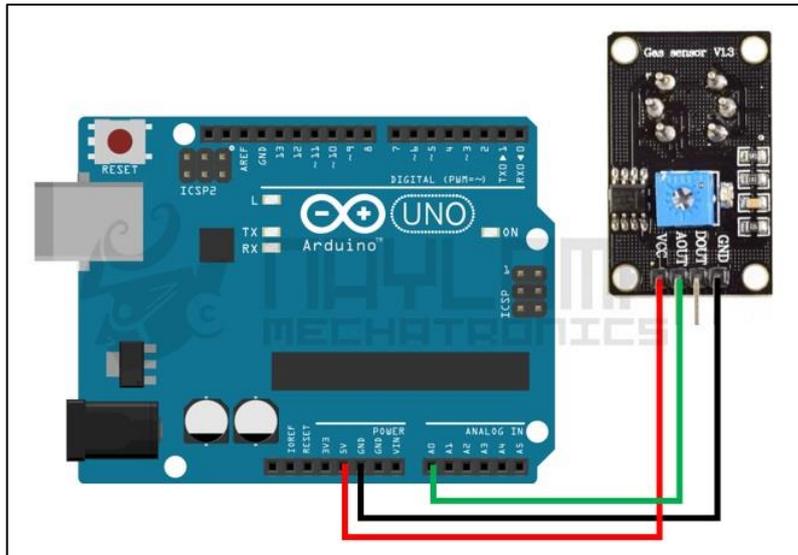
Variable medida	Concentración de gases en la atmósfera
Voltaje de alimentación	5 VDC
Potencia consumida	<800 Mw
Resistencia de la carga	Ajustable
Rango de medición	10-1000 ppm
Concentración de oxígeno recomendada	21%

## b) Acondicionamiento y procesamiento

La conexión entre el sensor MQ135 y el microcontrolador si se pretende leer la señal analógica es como se indica en la siguiente figura.

**Figura 72**

*Conexión entre arduino y sensor MQ135*



Fuente: Tecumshe (2021)

Para una operación adecuada, se debe regular el potenciómetro a 20K ohms y la concentración de oxígeno atmosférico debe ser cerca de 21%.

## c) Prueba y validación

Datos de la prueba:

Nombre de la prueba	Calibración del sensor de calidad del aire
Fecha y lugar de la prueba	10 de noviembre del 2021. La Molina, Lima.
Variable a calibrar	Concentración de distintos gases

Evidencias de la prueba:

### Figura 73

*Mediciones del sensor MQ135.*

```

/dev/ttyACM0
-----
adc:53 voltaje:0.26
adc:53 voltaje:0.26
adc:52 voltaje:0.25
adc:53 voltaje:0.26
adc:52 voltaje:0.25
adc:52 voltaje:0.25
adc:53 voltaje:0.26

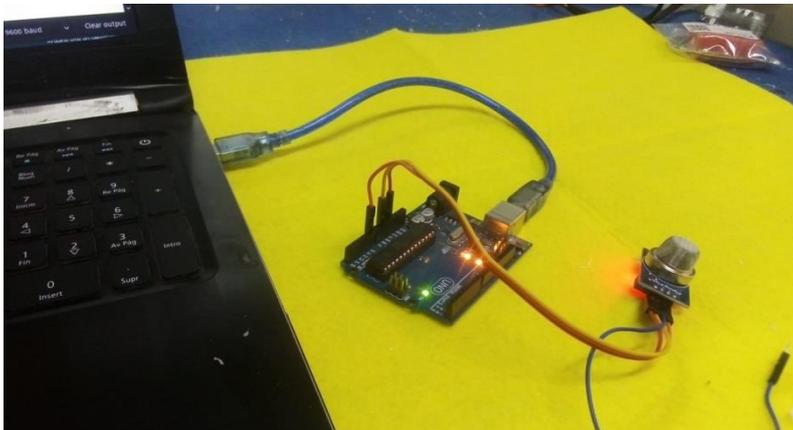
/dev/ttyACM0
-----
adc:260 voltaje:1.27
adc:259 voltaje:1.27
adc:258 voltaje:1.26
adc:257 voltaje:1.26
adc:255 voltaje:1.25
adc:254 voltaje:1.24
adc:253 voltaje:1.24
adc:252 voltaje:1.23
adc:251 voltaje:1.23
adc:250 voltaje:1.22
adc:248 voltaje:1.21

```

Elaborado por: los autores

### Figura 74

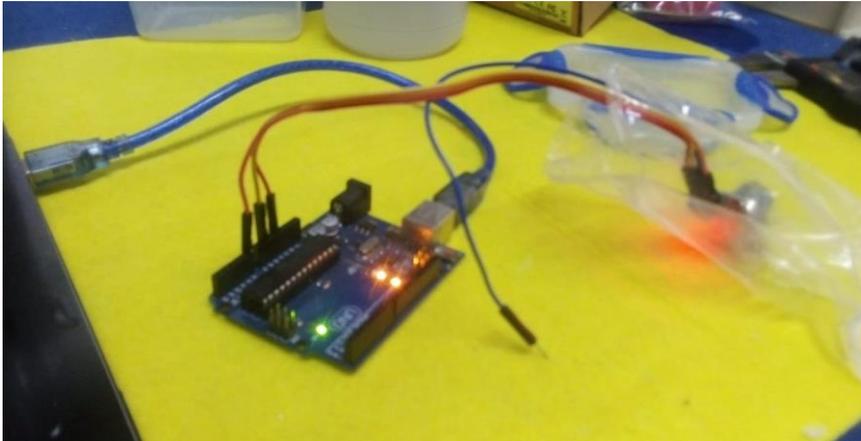
*Dispositivos dispuestos para prueba de calibración.*



Elaborado por: los autores

## Figura 75

Medición de calidad del aire en recipiente con alcohol.



Elaborado por: los autores

Resultados de calibración:

Se ha medido la concentración de gases al aire libre; a continuación, la concentración de alcohol en un recipiente con cierta cantidad de alcohol medicinal. Los resultados se muestran en la siguiente Tabla. 17:

**Tabla 17**

*Valores del sensor de calidad de aire*

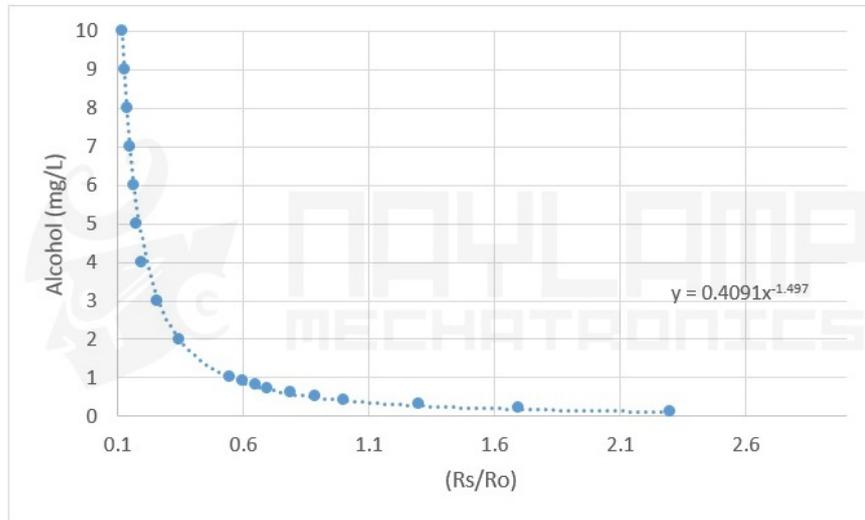
Condición atmosférica	Medición del sensor (V)	Concentración de ethanol (mg/L)
Aire libre (400 ppm CO <sub>2</sub> )	0.24V	0.05
	0.25 V	0.06
Recipiente con 20 mL de alcohol	0.51 V	0.19
	0.56V	0.21
Recipiente con 40 mL de alcohol	0.84 V	0.45
	0.85V	0.45
Recipiente con 80 mL de alcohol	1.30 V	1.03
	1.34 V	1.1

Elaborado por: los autores

La relación entre la concentración en el aire y el voltaje de salida del sensor es de acuerdo al siguiente gráfico:

**Figura 76**

*Relación entre concentración de alcohol y relación Rs/Ro.*



Elaborado por: los autores

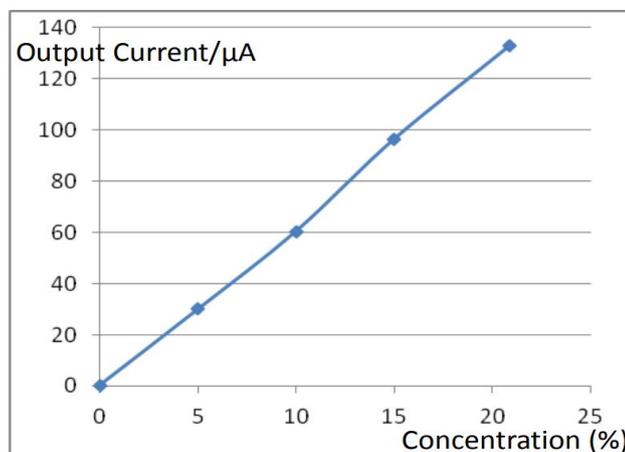
#### 5.4 Sensor de concentración de oxígeno ME2-O2

##### a) Principio de operación

El sensor ME2-O2 detecta la concentración de oxígeno a partir de la corriente generada en la celda electrolítica, la que es proporcional a la concentración de oxígeno en la celda. La relación directamente proporcional entre la corriente y la concentración de oxígeno se muestra en la Figura. 77.

**Figura 77**

*Relación entre corriente y Concentración*



Elaborado por: los autores

Especificaciones técnicas:

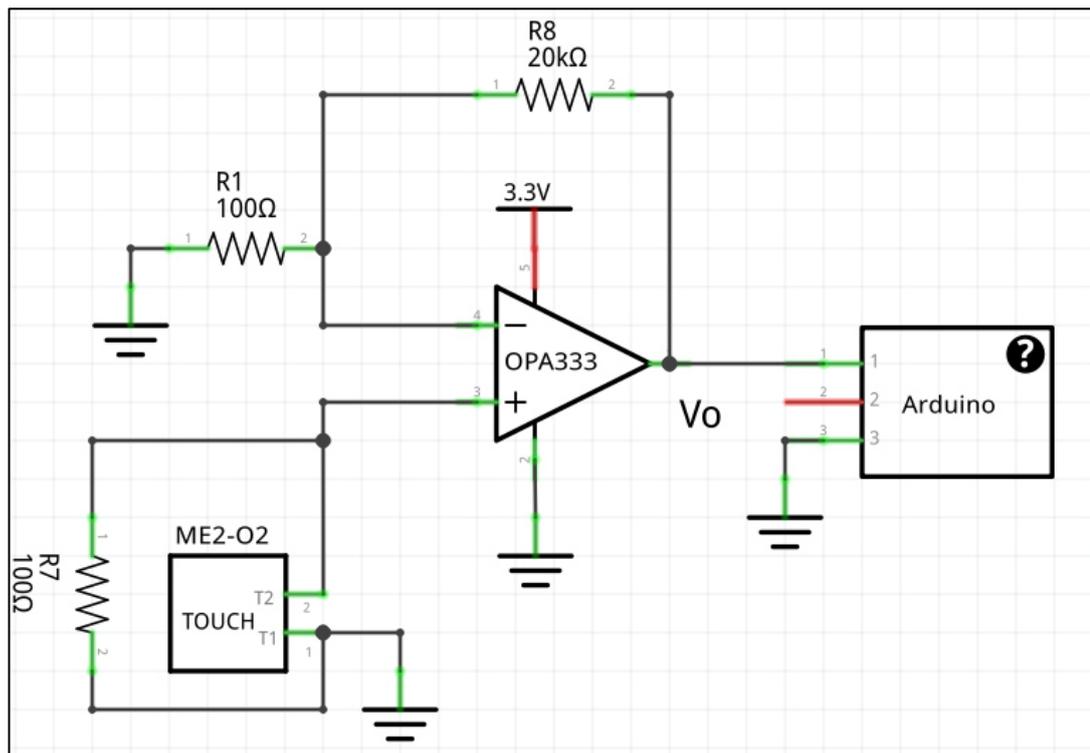
Variable medida	Concentración de oxígeno
Rango de medición	0 a 25% en volume
Tiempo de respuesta	<15 s
Resistencia de la carga	10 K ohms

### b) Acondicionamiento y procesamiento

El circuito que amplifica la señal del sensor ME2-O2 para que pueda ser procesada por el microcontrolador como un voltaje se muestra en la siguiente figura:

**Figura 78**

*Circuito de acondicionamiento*



Elaborado por: los autores

### c) Prueba y validación

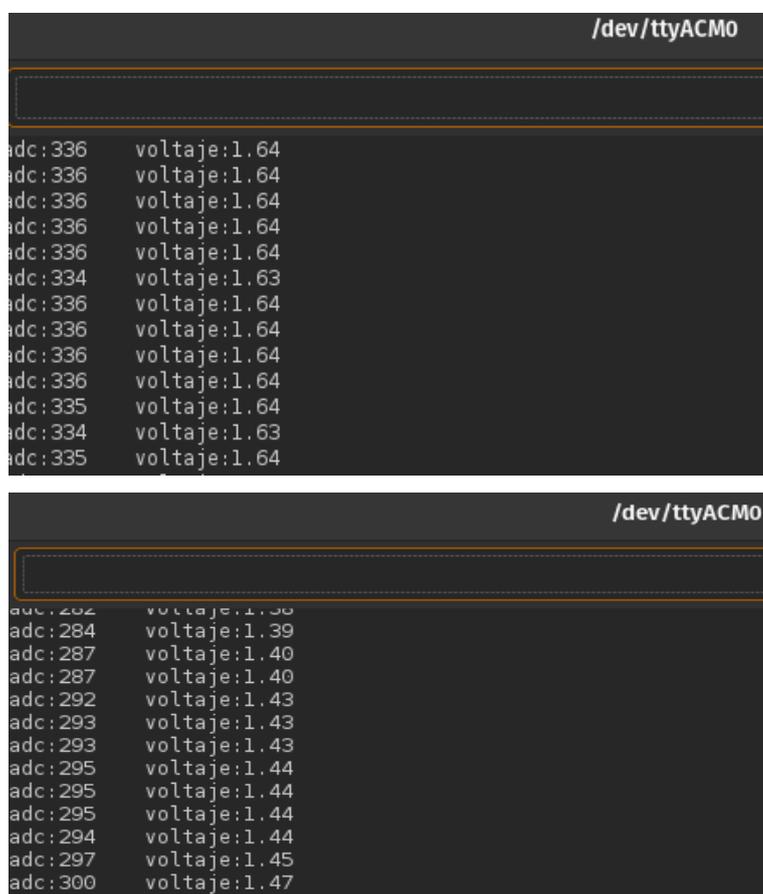
Datos de la prueba:

Nombre de la prueba	Calibración del sensor de concentración de oxígeno
Fecha y lugar de la prueba	10 de noviembre del 2021. La Molina, Lima.
Variable a calibrar	Concentración de oxígeno

Evidencias de la prueba:

#### Figura 79

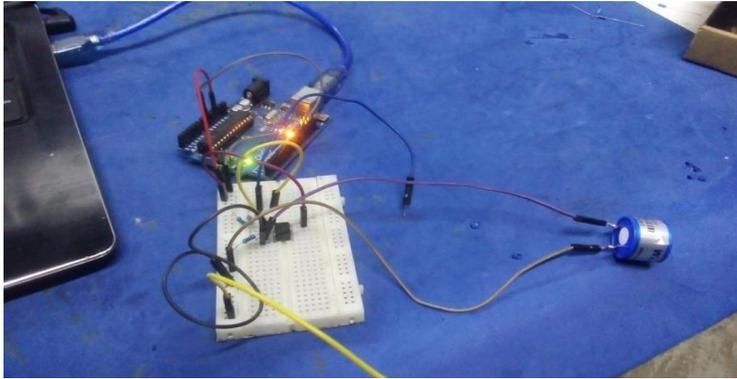
*Mediciones del sensor ME2-O2.*



Elaborado por: los autores

**Figura 80**

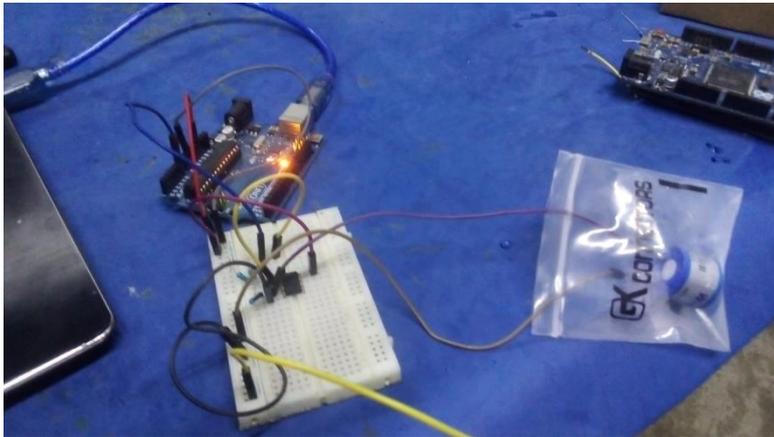
*Dispositivos dispuestos para prueba de calibración.*



Elaborado por: los autores

**Figura 81**

*Medición de concentración de oxígeno en recipiente lleno de CO<sub>2</sub>.*



Elaborado por: los autores

**Figura 82**

*Sensado de oxígeno en recipiente lleno de alcohol.*



Elaborado por: los autores

Resultados de calibración:

Se midió la concentración de oxígeno en el aire limpio, en un recipiente lleno de CO<sub>2</sub> y en un recipiente con alcohol de manera consecutiva, como se indica en la Tabla N°18 siguiente.

**Tabla 18**

*Valores del sensor de oxígeno*

Condición atmosférica	Medición del sensor (V)	Corriente de salida (uA)	Concentración de O <sub>2</sub>
Aire limpio	1.7	140	21.1
	1.68	139	20.8
Recipiente con CO <sub>2</sub>	1.45	120	18
	1.41	117	17.5
Recipiente con alcohol	1.51	125	18.7
	1.52	126	18.8

Elaborado por: los autores

La relación entre el voltaje medido por el controlador y la corriente de salida del transductor está dada por:

$$V_o = R_7 \cdot 121 \cdot I_o = 12100 I_o$$

Donde  $V_o$  está en voltios y  $I_o$ , en amperios.

La relación entre la corriente y la concentración de oxígeno está dada por la recta mostrada en la Figura. 77.

Se observa que el voltaje de salida y la corriente de salida; así como la concentración de oxígeno decrecen cuando el aire puro se mezcla con otros gases, como era de esperarse. Parámetros de calibración (Anexo 3).

## 5.5 Diseño de algoritmo con control PID

Dado que el regulador es PID con función de transferencia (4.1.27), se sabe que la señal de control en el dominio del tiempo se expresa:

$$u(t) = K_p e(t) + K_d e'(t) + K_I \int_0^t e(t) dt \quad (5.5.1)$$

Discretizando el dominio del tiempo:

$$t = iT$$

$T$ : periodo de muestreo

$$i = 0, 1, 2, 3, \dots$$

La señal de control discreta en función del error de medición se puede aproximar mediante (4.1.29),.

$$u(i) = K_p e(i) + K_d \frac{\Delta e(i)}{T} + K_I \sum_0^i e(i)T \quad (5.5.2)$$

Donde:

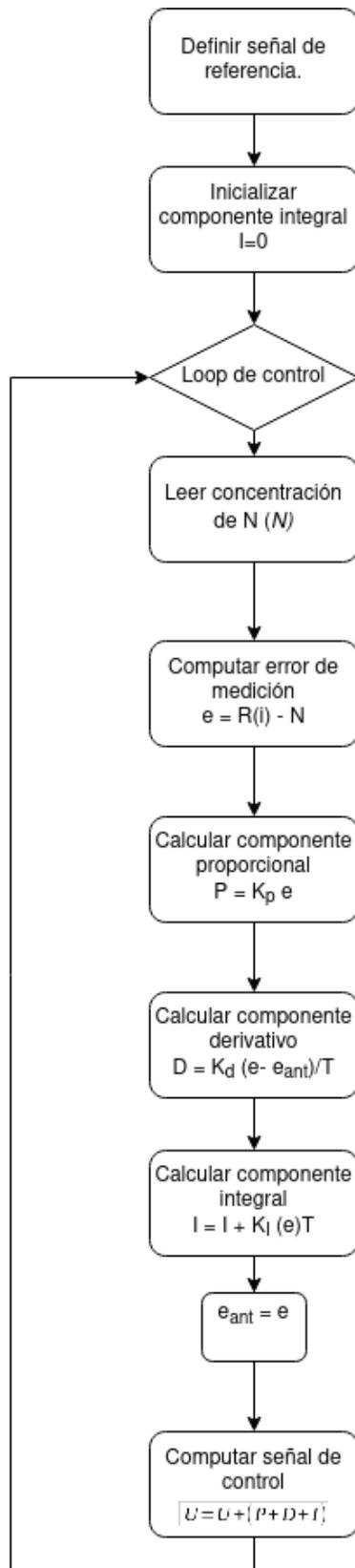
$u(i) = U(i) - \bar{U}(i)$ : señal de control en V.

$e(i) = R(i) - N(i)$ : error entre la referencia y la concentración de nitrógeno en mol/m<sup>3</sup>

Luego, la inyección de nitrógeno en la cámara puede ser controlada mediante el algoritmo mostrado en la siguiente figura.

**Figura 83**

*Algoritmo de control de la inyección de N2.*



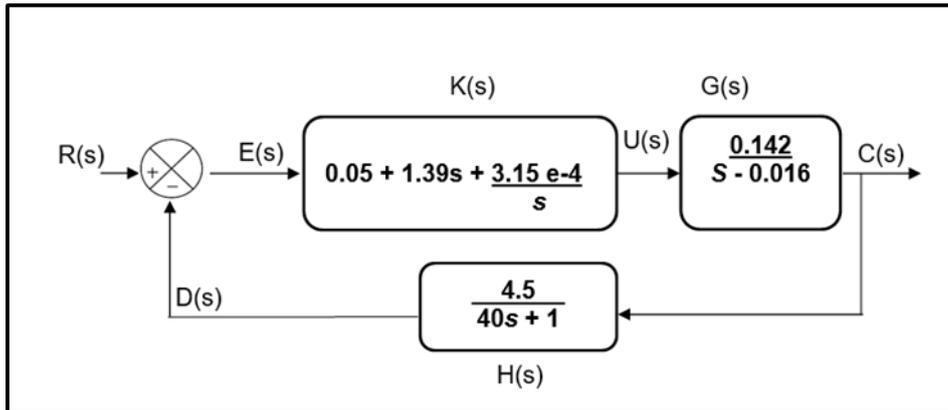
Elaborado por: los autores

## 5.6 Simulación del proceso de control

Mediante el software de simulación *Simulink*, se implementa el diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado, como se muestra en la siguiente Figura. 62.

**Figura 62**

*Diagrama de sistema en lazo cerrado.*

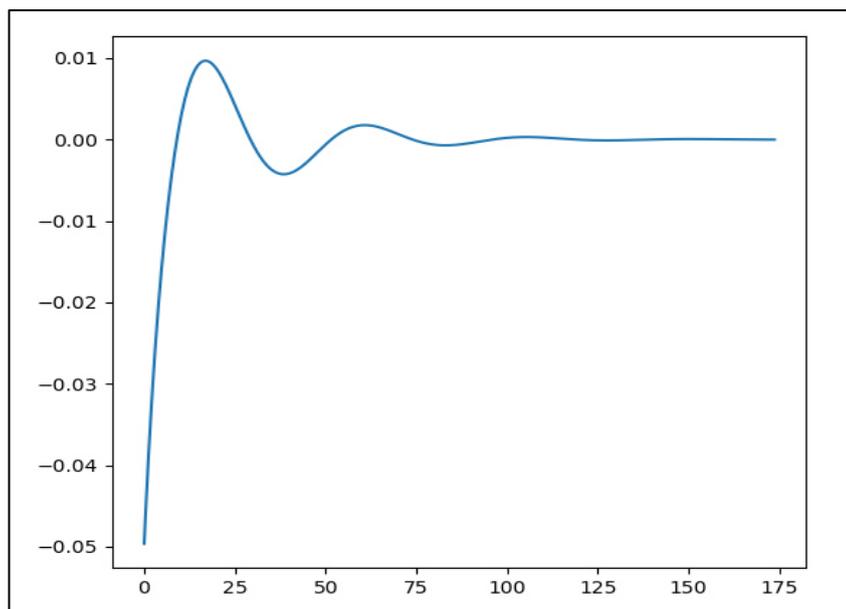


Elaborado por: los autores

Luego, las respuestas a la entrada impulso se muestran en la siguiente Figura. 84.

**Figura 84**

*Respuesta a la entrada impulso.*

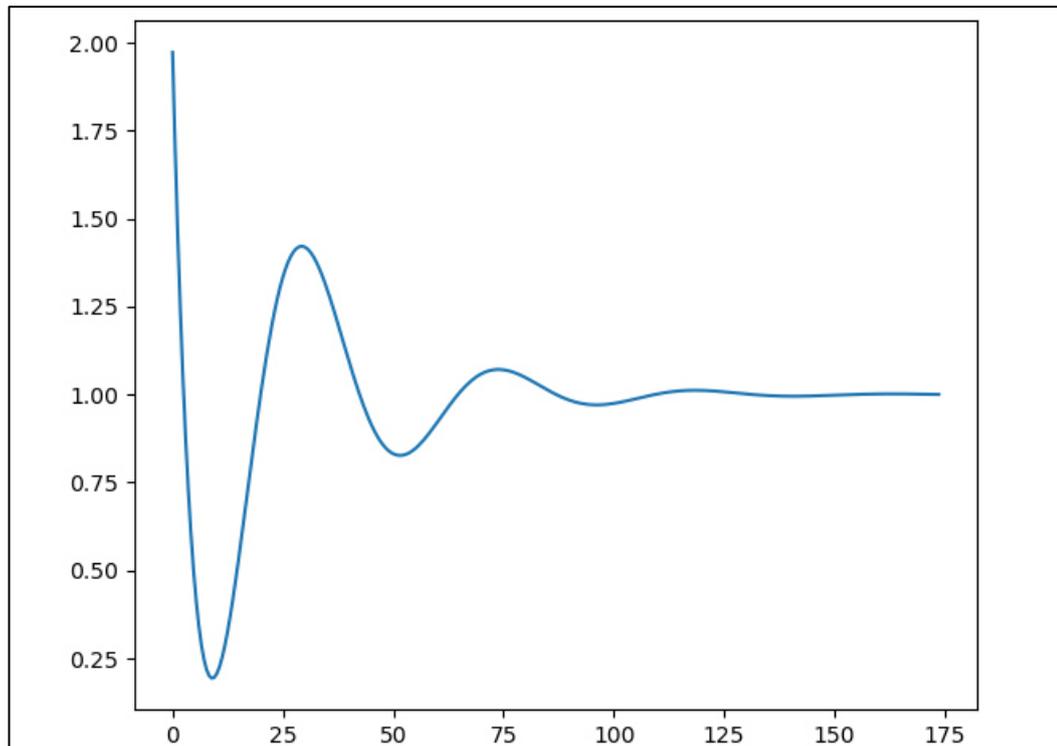


Elaborado por: los autores

Se observa que el sistema es oscila alrededor del valor 0. Las respuestas al escalón unitario se muestran en la siguiente Figura. 85.

**Figura 85**

*Respuesta al escalón unitario.*

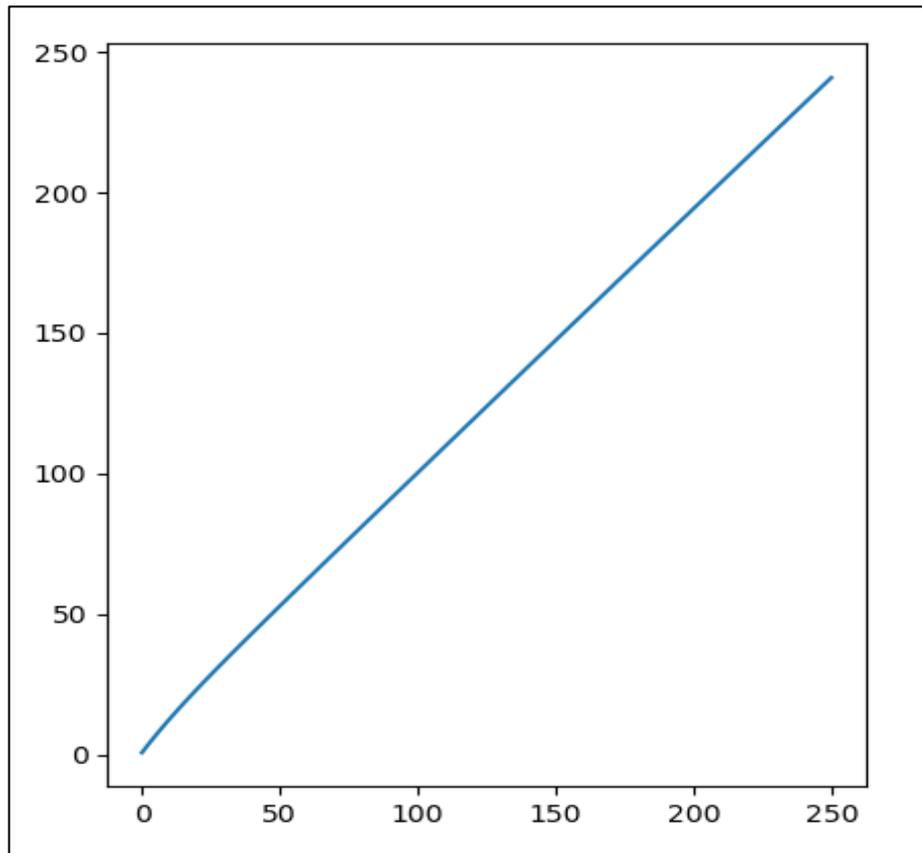


Elaborado por: los autores

Se observa que el sistema controlado en lazo cerrado pasa a ser estable con un error estacionario cercano a 0 y con un tiempo de establecimiento de alrededor de 100 segundos, similar al tiempo planteado en los requerimientos de diseño. La respuesta a la rampa unitaria se muestra en la siguiente Figura. 86.

**Figura 86**

*Respuesta a la rampa unitaria.*



Elaborado por: los autores

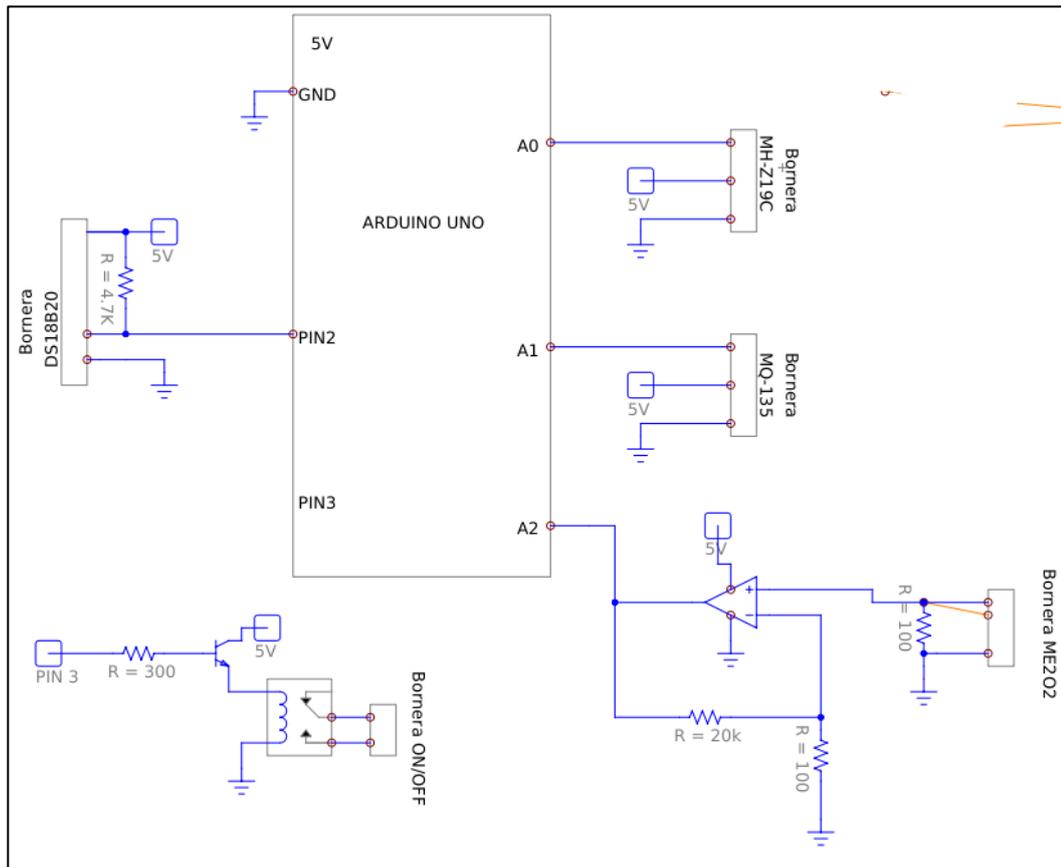
Se observa que la respuesta del lazo cerrado se asemeja a la entrada rampa, con un error estacionario cercano a 0.

**a) Esquemático del circuito de la etapa de control**

La etapa de control cuenta con un controlador y una interface HMI, así como con unos sensores para el monitoreo del ambiente y un sistema de potencia para controlar la válvula de inyección. El esquema del circuito correspondiente se muestra a continuación.

**Figura 87**

*Esquema del circuito de la etapa de control.*



Elaborado por: los autores

## CONCLUSIONES

1. Se diseñó un prototipo de una cámara de atmósfera controlada que permite el estudio de conservación de alimentos con capacidad de sensado de temperatura, oxígeno y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y control PID del nivel de nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) como se han planteado en los objetivos de acuerdo a los requerimientos.
2. Se definieron las variables para el debido control y monitoreo, así como la selección de componentes, circuitos de interfaz apropiadas y la programación del aplicativo de control para el usuario.
3. Para el diseño de la cámara se modeló matemáticamente el sistema, de tal forma que nos permitió escoger de acuerdo a las características los mejores sensores para su desarrollo.
4. Se logró que la captura de datos se realice a través de una pantalla que se puede visualizar en la parte externa de la cámara o también a través de una laptop con el programa de Raspberry Pi, de esta forma se garantiza una mejor clasificación de datos para los sensores.
5. Se cumplió con un estricto protocolo de prueba para validación del diseño.
6. El prototipo puede ser utilizado para almacenar diversos tipos de alimentos, y estos se pueden guardar con una capacidad máxima de 5 Kg., ya que el diseño del prototipo tiene esa capacidad de almacenaje.

7. El diseño del prototipo es muy simple y permite un fácil uso de las personas que lo van a utilizar, esto beneficia a todo el personal del laboratorio puesto que puede realizar sus actividades con rapidez y eficiencia.
8. Se considera un tiempo de asentamiento con un criterio del 2%, y que no sobrepase del 5%, puesto que de hacerlo se pondría en riesgo los valores calculados, estos podrían no cumplir con lo estipulado y por ende los alimentos no se conservarían el tiempo requerido.
9. El sistema funciona a nivel de prototipo puesto que se cumplió con los objetivos trazados a inicios del proyecto.

## **RECOMENDACIONES**

1. Implementar un equipo multidisciplinario el cual permita manipular adecuadamente los sensores y darles un mantenimiento periódicamente. Un golpe puede de dañar dichos sensores y la suciedad dará mediciones erradas.
2. Limpiar el filtro de aire a la salida del compresor, que evite el ingreso de impurezas y partículas grandes a la cámara de atmósfera controlada la cual puede causar oxidación de líquido.
3. Capacitar a las personas que manipulen la cámara de atmósfera, para modificar los parámetros a controlar como es la temperatura, oxígeno y dióxido de carbono.
4. Ubicar la cámara de atmósfera controlada en un ambiente de temperatura idónea que no excedan las altas temperaturas para favorecer la conservación de los alimentos. Además, se puede adicionar un control de monitoreo de temperatura que genere una alarma en caso que la temperatura exceda este valor.

## REFERENCIAS

- AGRORRIPE. (2020, mayo 10). *Controlled Atmosphere CA Storage* | Agrorripe. [www.agrorripe.com](http://www.agrorripe.com). <https://www.agrorripe.com/ca-storage>
- Alba, J., Chavéz, S., Martínez, A. J., Urrutia, H., Cruz, H., & Aquino, B. (2019). Uso de atmósferas controladas para conservar la calidad de tuna roja (*Opuntia ficus-indica* (L.)) mínimamente procesada. *Nova scientia*, 11(23), 49–64. <https://doi.org/10.21640/NS.V11I23.1955>
- Alzate, A. O., & Guerrero, J. (2018). *Diseño e implementación de un prototipo de control de humedad relativa para una cámara existente en el laboratorio de metrología de variables eléctricas de la Universidad Tecnológica de Pereira* [Tesis de licenciatura - Universidad Tecnológica de Pereira]. <https://core.ac.uk/download/188427713.pdf>
- Andino, R. J. F. (1984). *Cálculo y diseño de cámaras frigoríficas con atmósferas controladas* [Tesis de licenciatura - Escuela Superior Politécnica del Litoral]. <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/41220>
- Artés, C. F. (2006). El envasado en atmósfera modificada mejora la calidad de consumo de los productos hortofrutícolas intactos y mínimamente procesados en fresco. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 7(2), 61–85.

<https://www.redalyc.org/pdf/813/81370202.pdf>

Calvo, G., & Candan, A. P. (2016). Guía para la identificación de fisiopatías en manzanas y peras. *RIA. Revista de investigaciones agropecuarias*, 42(3), 7.

[http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1669-23142016000300009](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1669-23142016000300009)

Carbonell, Z. L. (2017). *Diseño y cálculo de una nave hortofrutícola destinada al almacenamiento y procesado del caqui (diospyros kaki thunb.) En el municipio de Algemesí (Valencia)* [Tesis de licenciatura - Universitat Politècnica de València]. [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/88609/CARBONELL - Diseño y cálculo de una nave hortofrutícola destinada al almacenamiento y procesado d....pdf?sequ](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/88609/CARBONELL-Diseño_y_cálculo_de_una_nave_hortofrutícola_destinada_al_almacenamiento_y_procesado_d....pdf?sequ)

Crotti, Y. (2020). *Impacto da utilização das novas tecnologias da informação e comunicação na qualidade de frutas conservadas em atmosfera controlada* [Tesis de maestría - Universidade Federal de Santa Catarina].

<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/216371/PTIC0086-D.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>

De la Vega, J., Cañarejo, M., & Pinto, N. (2017). Avances en Tecnología de Atmósferas Controladas y sus Aplicaciones en la Industria. Una Revisión. *Información Tecnológica*, 28(3), 75–86. <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v28n3/art09.pdf>

Dilley, D. R. (2006). Development of controlled atmosphere storage technologies. *Stewart Postharvest Review*, 2(6), 1–8. <https://doi.org/10.2212/SPR.2006.6.5>

Hernández, C., Pérez, Á., & Escobedo, B. (2021, septiembre 15). *Sistema de atmósfera controlada para la conservación de la manzana*. [mexico.infoagro.com](https://mexico.infoagro.com). <https://mexico.infoagro.com/sistema-de-atmosfera-controlada-para-la-conservacion-de-la-manzana/>

INTAGRI. (2017). *Atmósferas Controladas y Modificadas en Postcosecha*.

www.intagri.com. <https://www.intagri.com/articulos/poscosecha-comercializacion/atmosferas-controladas-y-modificadas-en-postcosecha>

Instrumentación Dinámica. (2013, diciembre 2). *Principios de Temperatura y Tipos de Equipos de Medición | Instrumentación: Equipos y Principios*. [instrumentaciondinamica2013.blogspot.com](http://instrumentaciondinamica2013.blogspot.com).  
<http://instrumentaciondinamica2013.blogspot.com/2013/12/blog-post.html>

López, V. J., Valverde, J. F., Mejía, T. S., López, A. G., & Vega, G. M. (2011). Efecto del almacenamiento en atmósfera controlada sobre la calidad poscosecha y nutricional del tomate. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 17(2).  
[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1027-152X2011000200005](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027-152X2011000200005)

Martínez, de Z. L. (2011). *Evaluación de la calidad de kiwis almacenados en refrigeración envasados en distintas atmósferas modificadas y el uso de 1-MCP* [Tesis de licenciatura - Universidad Nacional de Mar de La Plata]. <http://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/3845/577482.pdf?sequence=1>

Mazonde, B., Mujuru, F., & Muredzi, P. (2017). Diseño de un Almacenamiento en Atmósfera Controlada Facilidad para Frutas Climatéricas. *Revista Internacional de Desarrollo Rural, Medio Ambiente e Investigación*, 1(1), 47–59.  
<https://aipublications.com/ijreh/detail/design-of-a-controlled-atmospheric-storage-facility-for-climacteric-fruits/>

Montoya, D. (2005). Tecnología de atmósferas controladas para frutas y hortalizas, caso de estudio: modelo aguacate (persea americana) variedad hass. *Publicaciones e Investigación*, 1(1), 77–85.  
<https://oaji.net/articles/2017/5082-1499957743.pdf>

Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna* (E. Talancón (ed.); 3a ed.). Pearson. <https://biblioteca.cio.mx/ebooks/e0213.pdf>

Ospina, M. S., & Cartagena, V. J. (2008). La atmósfera modificada: una

alternativa para la conservación de los alimentos. *Revista Lasallista de Investigación*, 5(2), 112–123.  
[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1794-44492008000200014](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-44492008000200014)

Paredes, O. G., Avalos, C. C., & Mendez, V. W. (2015). Efecto de atmosfera controlada sobre la calidad post-cosecha y tiempo de vida útil de *Persea americana* “Palto” var. Hass. *Postcosecha e industrialización*, 8, 430–436.

[https://www.avocadosource.com/WAC8/Section\\_05/ObandoParedes2015b.pdf](https://www.avocadosource.com/WAC8/Section_05/ObandoParedes2015b.pdf)

Pérez, A. J., Zapata, S. L., Lafuente, R. V., & Toledano, M. A. (2008). Almacenamiento de naranjas cv. “Salustiana” Ycv. “Valencia” y su influencia en la calidad del zumo (III). *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 9(2), 113–120.  
<https://www.redalyc.org/pdf/813/81315076004.pdf>

Pinto, M., De la Vega, J., & Cañarejoa, M. (2016). View of Utilización del método de conservación bajo atmósferas controladas en frutas y hortalizas. *Agroindustrial Science*, 6, 231–238.  
<https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/agroindscience/article/view/1280/1208>

Rodríguez, M., Wyss, A., & Hormazábal, N. (2015). Evaluación de bolsa atmósfera modificada y concentraciones de anhídrido sulfuroso aplicadas sobre frutos de arándano alto (*Vaccinium corymbosum* L.) cv. Emerald. *Scientia Agropecuaria*, 6(4), 259–270.  
<https://doi.org/10.17268/SCI.AGROPECU.2015.04.03>

Ruiz, M. J. (2016). *Diseño y construcción de una cámara de temperatura controlad* [Tesis de licenciatura - Universidad Nacional Autónoma de México].  
[http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/12168/Tesis\\_Mecánica\\_JPRM.pdf?sequence=1](http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/12168/Tesis_Mecánica_JPRM.pdf?sequence=1)

Sierra, B. (2019). *Desarrollo de una cámara de atmósfera controlada para la conservación de alimentos en fresco* [Tesis de licenciatura - Universidad

Pontificia

Bolivariana].

<https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/8539/39263.pdf?sequence=1>

Silva, G. J., & Soto, O. M. (2019). *Diseño de la automatización de la cámara climatizada para pruebas de equipos y materiales* [Tesis de licenciatura - Fundación Universidad de América]. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7330/1/4132728-2019-1-IM.pdf>

Villanueva, Q. (2014). *Conservación de mango (mangifera indica l.) Envasado en atmósfera modificada* [Tesis de licenciatura - Universidad Nacional del Santa]. <https://docplayer.es/83741890-Universidad-nacional-del-santa.html>

Wang, Q. G., Zhang, Z., Astrom, K. J., Zhang, Y., & Zhang, Y. (2008). Guaranteed Dominant Pole Placement with PID Controllers. *The International Federation of Automatic Control Seoul*, 17, 6–11. <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.0036>

## ANEXOS

	Pág.
Anexo A Características técnicas de sensores .....	149
Anexo B Dinámica de propagación de parámetros de sensores y actuadores.....	161
Anexo C Comparativo y elección de sensores.....	169
Anexo D Parámetros y especificaciones técnicas de componentes .....	180

## Anexo A

### Características técnicas de sensores

#### ME2-O<sub>2</sub>-Φ20 Oxygen Sensor

ME2-O<sub>2</sub>-Φ20 electrochemical sensor detect gas concentration by measuring current based on the electrochemical principle, which utilizes the electrochemical oxidation process of target gas on the working electrode inside the electrolytic cell, the current produced in electrochemical reaction of the target gas are in direct proportion with its concentration while following Faraday law, then concentration of the gas could be get by measuring value of current.

##### 1. Features

- \* Low consumption
- \* High precision
- \* High sensitivity
- \* Wide linear range
- \* Good anti-interference ability
- \* Excellent repeatability and stability



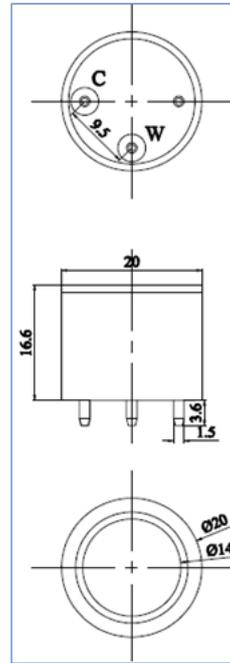
##### 2. Application

Detecting O<sub>2</sub> in mine, industry and environmental protection field.

##### 3. Technical Parameter

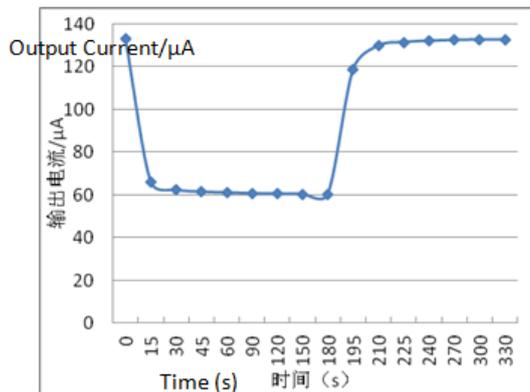
##### 4. External dimension

Item	Parameter
Detection gas	O <sub>2</sub>
Measurement Range	0~25%Vol
Max detecting concentration	30%Vol
Sensitivity	(0.1~0.3) mA (In air)
Response time (T <sub>90</sub> )	≤15S
Load resistance (recommended)	10kΩ
Repeatability	<2% output value
Stability ( / month)	<2%
Zero drift (-20℃ ~40℃ )	≤0.1%vol
Storage temperature	-20℃ ~50℃
Storage Humidity	0%~99%RH
Pressure range	normal atmosphere±10%
Anticipated using life	2 years

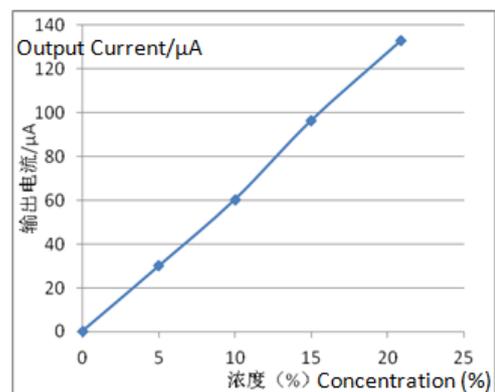


## 5. Characterization

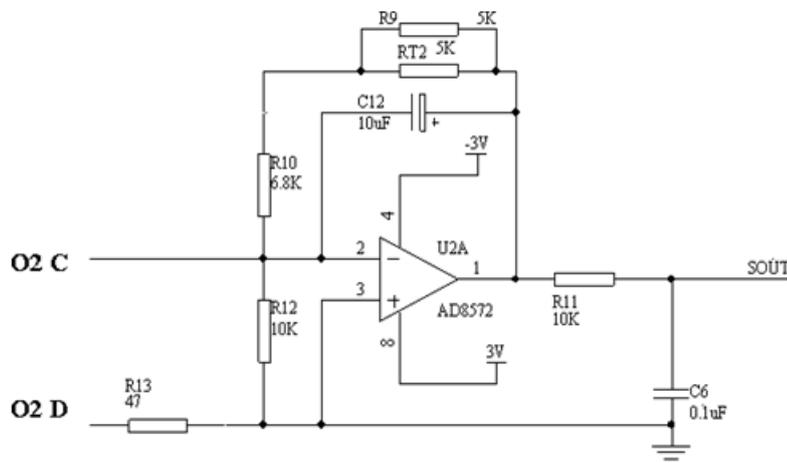
### Features of Sensitivity, response and output signal

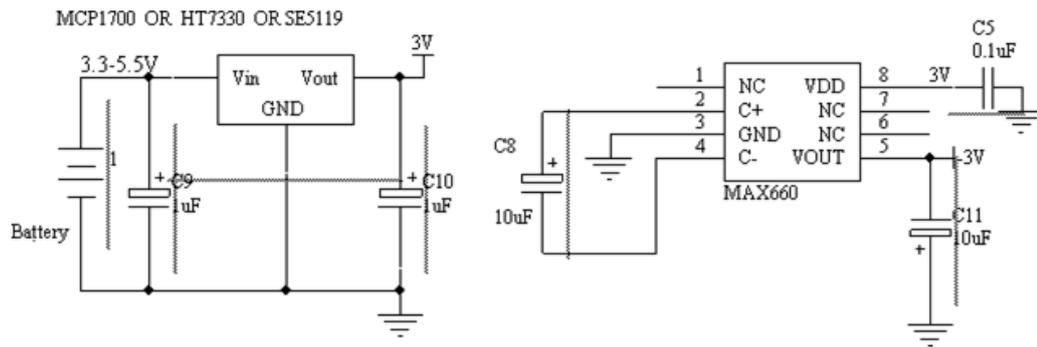


### Data graph of concentration linearity features



## 6. Basic circuit





## 7. Application Notes:

- Sensor shall Avoid organic solvent, coatings, medicine, oil and high concentration gases ;
- All ME Sensors shall not be encapsulated completely by resin materials, and shall not immerse in pure oxygen environment, otherwise, it will damage the function of sensor ;
- All ME sensors shall not be applied in corrosive gas environment, or the sensor will be damaged ;
- Please test the sensitivity of gas sensors in clean atmosphere ;
- Sensors Shall be avoided to face the gas, which flow directly from front side ;
- To avoid to bend and break of pins ;
- Blowhole of the sensor should not be blocked and polluted, which will cause the sensitivity decrease ;
- Excessive impact or vibration should be avoided ;
- Do not use the sensor when the shell is damaged ;
- It takes some time for the sensor to return to normal state After applied in high concentration gas ;
- Do not take apart the sensor, otherwise electrolyte leakage can cause sensor damage ;
- Working electrode and reference electrode of the sensor shall be in short circuit when stored. ;
- To preheat over 48hs before using and soldering forbidden ;

**General Description**

The DS18B20 digital thermometer provides 9-bit to 12-bit Celsius temperature measurements and has an alarm function with nonvolatile user-programmable upper and lower trigger points. The DS18B20 communicates over a 1-Wire bus that by definition requires only one data line (and ground) for communication with a central microprocessor. In addition, the DS18B20 can derive power directly from the data line ("parasite power"), eliminating the need for an external power supply.

Each DS18B20 has a unique 64-bit serial code, which allows multiple DS18B20s to function on the same 1-Wire bus. Thus, it is simple to use one microprocessor to control many DS18B20s distributed over a large area. Applications that can benefit from this feature include HVAC environmental controls, temperature monitoring systems inside buildings, equipment, or machinery, and process monitoring and control systems.

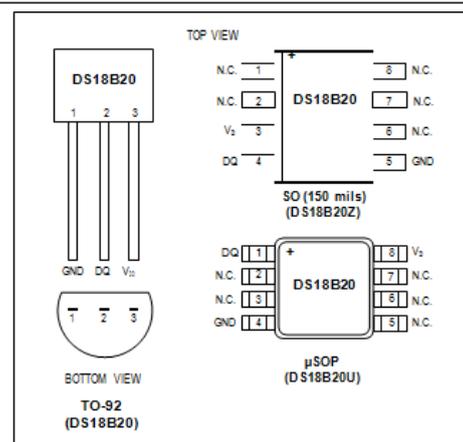
**Applications**

- Thermostatic Controls
- Industrial Systems
- Consumer Products
- Thermometers
- Thermally Sensitive Systems

**Benefits and Features**

- Unique 1-Wire® Interface Requires Only One Port Pin for Communication
- Reduce Component Count with Integrated Temperature Sensor and EEPROM
  - Measures Temperatures from -55°C to +125°C (-67°F to +257°F)
  - ±0.5°C Accuracy from -10°C to +85°C
  - Programmable Resolution from 9 Bits to 12 Bits
  - No External Components Required
- Parasitic Power Mode Requires Only 2 Pins for Operation (DQ and GND)
- Simplifies Distributed Temperature-Sensing Applications with Multidrop Capability
  - Each Device Has a Unique 64-Bit Serial Code Stored in On-Board ROM
- Flexible User-Definable Nonvolatile (NV) Alarm Settings with Alarm Search Command Identifies Devices with Temperatures Outside Programmed Limits
- Available in 8-Pin SO (150 mils), 8-Pin μSOP, and 3-Pin TO-92 Packages

**Pin Configurations**



*Ordering Information appears at end of data sheet.*

*1-Wire is a registered trademark of Maxim Integrated Products, Inc.*

## Absolute Maximum Ratings

Voltage Range on Any Pin Relative to Ground..... V to +6.0V  
 Operating Temperature Range..... -55°C to +125°C

Storage Temperature Range..... -55°C to +125°C  
 Solder Temperature..... Refer to the IPC/JEDEC  
 J-STD-020 Specification.

*These are stress ratings only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operation sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods of time may affect reliability.*

## DC Electrical Characteristics

(-55°C to +125°C;  $V_{DD} = 3.0V$  to  $5.5V$ )

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Supply Voltage	$V_{DD}$	Local power (Note 1)	+3.0		+5.5	V
Pullup Supply Voltage	$V_{PU}$	Parasite power	+3.0		+5.5	V
		Local power	+3.0		$V_{DD}$	
Thermometer Error	$t_{ERR}$	-10°C to +85°C			±0.5	°C
		-30°C to +100°C			±1	
		-55°C to +125°C			±2	
Input Logic-Low	$V_{IL}$	(Notes 1, 4, 5)	-0.3		+0.8	V
Input Logic-High	$V_{IH}$	Local power	+2.2		The lower of 5.5 or $V_{DD} + 0.3$	V
		Parasite power	+3.0			
Sink Current	$I_L$	$V_{I/O} = 0.4V$	4.0			mA
Standby Current	$I_{DDs}$	(Notes 7, 8)		750	1000	nA
Active Current	$I_{DD}$	$V_{DD} = 5V$ (Note 9)		1	1.5	mA
DQ Input Current	$I_{DQ}$	(Note 10)		5		µA
Drift		(Note 11)		±0.2		°C

**Note 1:** All voltages are referenced to ground.

**Note 2:** The Pullup Supply Voltage specification assumes that the pullup device is ideal, and therefore the high level of the pullup is equal to  $V_{PU}$ . In order to meet the  $V_{IH}$  spec of the DS18B20, the actual supply rail for the strong pullup transistor must include margin for the voltage drop across the transistor when it is turned on; thus:  $V_{PU\_ACTUAL} = V_{PU\_IDEAL} +$

**Note 3:** See typical performance curve in [Figure 1](#). Thermometer Error limits are 3-sigma values.

**Note 4:** Logic-low voltages are specified at a sink current of 4mA.

**Note 5:** To guarantee a presence pulse under low voltage parasite power conditions,  $V_{ILMAX}$  may have to be reduced to as low as 0.5V.

**Note 6:** Logic-high voltages are specified at a source current of 1mA.

**Note 7:** Standby current specified up to +70°C. Standby current typically is 3µA at +125°C.

**Note 8:** To minimize  $I_{DDs}$ , DQ should be within the following ranges:  $GND \leq DQ \leq GND + 0.3V$  or  $V_{DD} - 0.3V \leq DQ \leq V_{DD}$ .

**Note 9:** Active current refers to supply current during active temperature conversions or EEPROM writes.

**Note 10:** DQ line is high ("high-Z" state).

**Note 11:** Drift data is based on a 1000-hour stress test at +125°C with  $V_{DD} = 5.5V$ .

## AC Electrical Characteristics–NV Memory

(-55°C to +125°C;  $V_{DD} = 3.0V$  to 5.5V)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
NV Write Cycle Time	$t_{WR}$			2	10	ms
EEPROM Writes	$N_{EEWR}$	-55°C to +55°C	50k			writes
EEPROM Data Retention	$t_{EEDR}$	-55°C to +55°C	10			years

## AC Electrical Characteristics

(-55°C to +125°C;  $V_{DD} = 3.0V$  to 5.5V)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Temperature Conversion Time	$t_{CONV}$	9-bit resolution			93.75	ms
		10-bit resolution	(Note 12)		187.5	
		11-bit resolution			375	
		12-bit resolution			750	
Time to Strong Pullup On	$t_{SPON}$	Start convert T command issued			10	$\mu s$
Time Slot	$t_{SLOT}$	(Note 12)	60		120	$\mu s$
Recovery Time	$t_{REC}$	(Note 12)	1			$\mu s$
Write 0 Low Time	$t_{LOW0}$	(Note 12)	60		120	$\mu s$
Write 1 Low Time	$t_{LOW1}$	(Note 12)	1		15	$\mu s$
Read Data Valid	$t_{RDV}$	(Note 12)			15	$\mu s$
Reset Time High	$t_{RSTH}$	(Note 12)	480			$\mu s$
Reset Time Low	$t_{RSTL}$	(Notes 12, 13)	480			$\mu s$
Presence-Detect High	$t_{PDHIGH}$	(Note 12)	15		60	$\mu s$
Presence-Detect Low	$t_{PDLOW}$	(Note 12)	60		240	$\mu s$
Capacitance	$C_{IN/OUT}$				25	pF

**Note 12:** See the timing diagrams in [Figure 2](#).

**Note 13:** Under parasite power, if  $t_{RSTL} > 960\mu s$ , a power-on reset can occur.

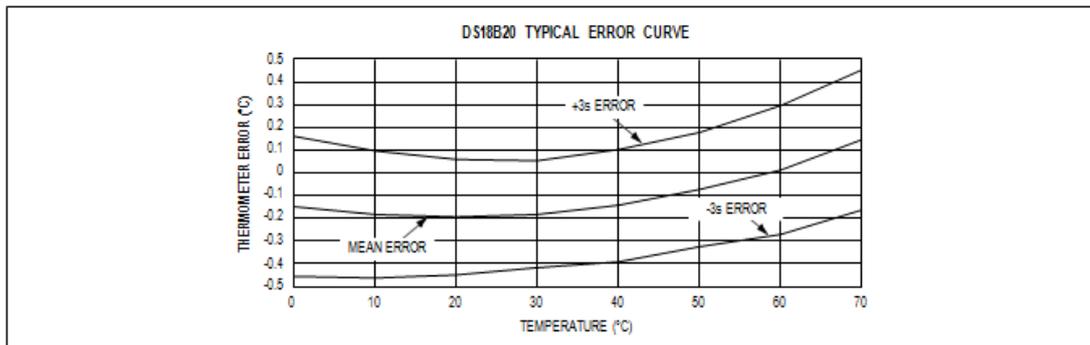


Figure 1. Typical Performance Curve

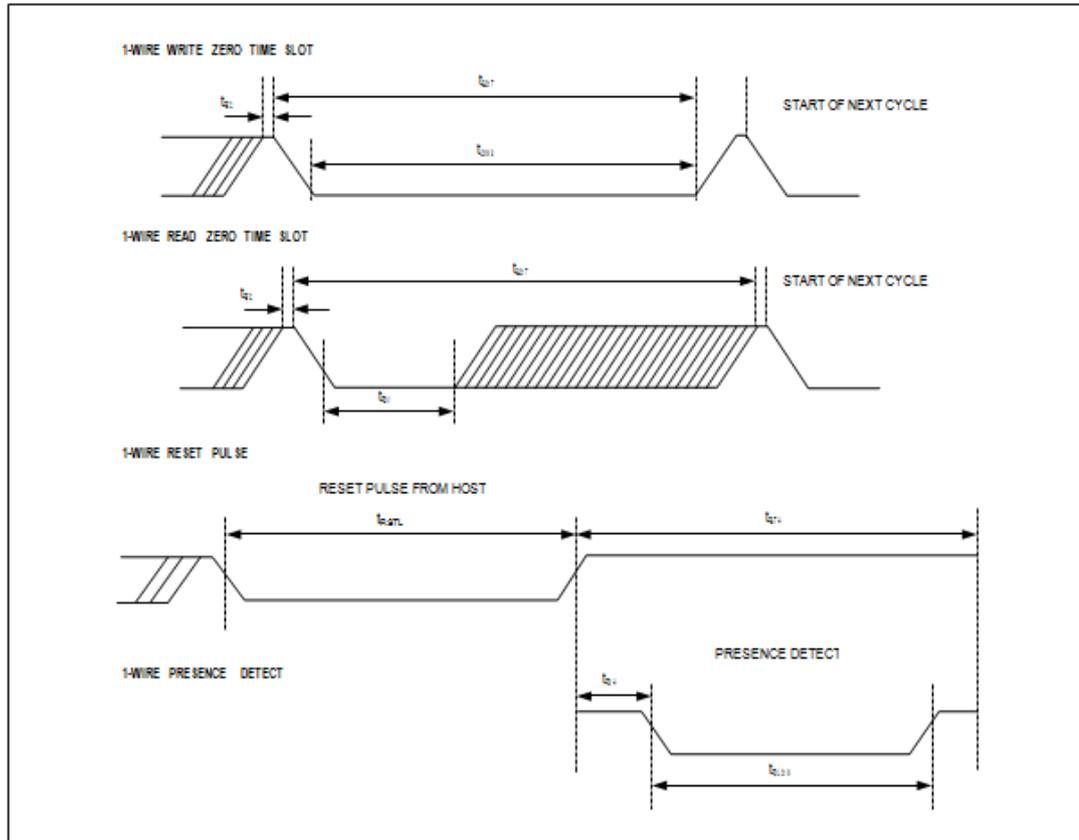


Figure 2. Timing Diagrams

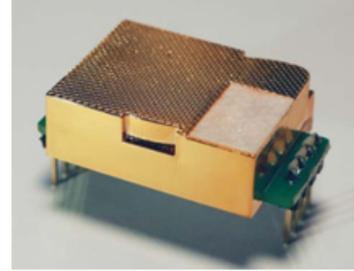
## Pin Description

PIN			NAME	FUNCTION
SO	$\mu$ SOP	TO-92		
1, 2, 6, 7, 8	2, 3, 5, 6, 7	—	N.C.	No Connection
3	8	3	VDD	Optional VDD. VDD must be grounded for operation in parasite power mode.
4	1	2	DQ	Data Input/Output. Open-drain 1-Wire interface pin. Also provides power to the device when used in parasite power mode (see the <i>Powering the DS18B20</i> section.)
5	4	1	GND	Ground

## MH-Z19C NDIR CO2 Module

### Profile

MH-Z19C NDIR infrared gas module is a common type, small size sensor, using non-dispersive infrared (NDIR) principle to detect the existence of CO2 in the air, with good selectivity, non-oxygen dependent and long life. Built-in temperature compensation; and it has UART output and PWM output. It is developed by the tight integration of mature infrared absorbing gas detection technology, precision optical circuit design and superior circuit design.



### Applications

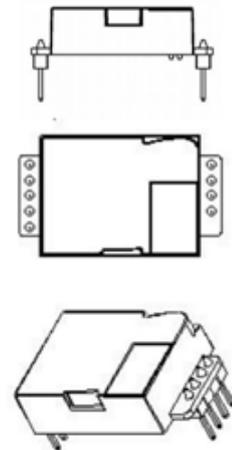
- \*HVAC refrigeration
- \*Air cleaner device
- \*Indoor air quality monitoring
- \*Smart home
- \*Ventilation system
- \*School

### Main Features

- \*Chamber is gold plated
- \*High sensitivity, low power consumption
- \*Good stability
- \*Temperature compensation, excellent linear output
- \*Multiple output modes: UART, PWM
- \*Long lifespan
- \*Anti-water vapor interference, anti-poisoning

### Main parameters

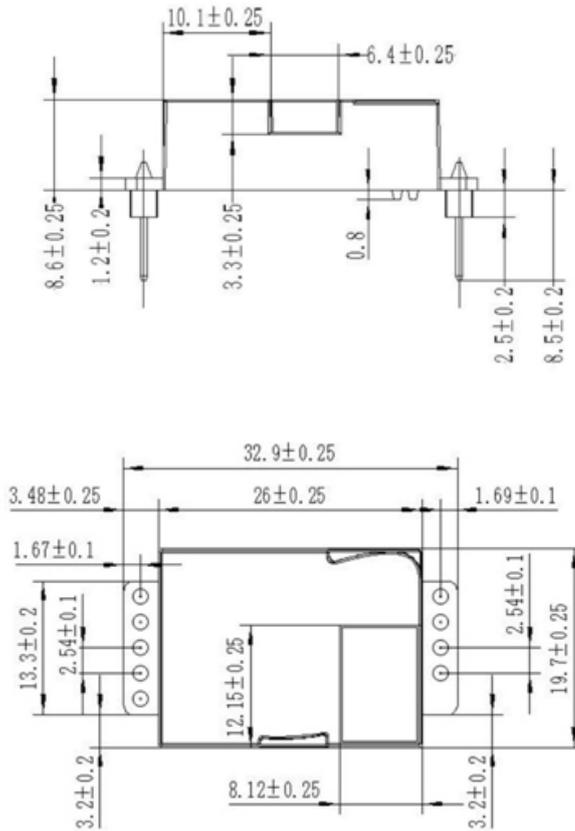
Model No.	MH-Z19C
Detection Gas	CO2
Working voltage	5.0 ± 0.1V DC
Average current	< 40mA (@5V power supply)
Peak current	125mA (@5V power supply)
Interface level	3.3 V (Compatible with 5V)
Detection Range	400~5000ppm(optional)
Output signal	Serial Port (UART) (TTL level 3.3V)
	PWM
Preheat time	1 min
Response Time	T <sub>90</sub> < 120 s
Working temperature	-10 ~ 50 °C
Working humidity	0 ~ 95% RH (No condensation)
Weight	5 g
Lifespan	> 5 years



## Detection range and accuracy

Detection Gas	Formula	Detection Range	Accuracy
Carbon Dioxide	CO <sub>2</sub>	400~2000ppm	± (50ppm+5% reading value)
		400~5000ppm	

## Dimensions



## Pins connection type:

Pin	Pin Definition
Vin	Positive pole of power (Vin)
GND	Negative pole of power (GND)
PWM	PWM
Hd	HD(zero point calibration, low level lasting for over 7s is effective)
Rx	UART(RXD)TTL Level data input
Tx	UART(TXD)TTL Level data output



# TECHNICAL DATA

# MQ-135 GAS SENSOR

## FEATURES

Wide detecting scope      Fast response and High sensitivity  
 Stable and long life      Simple drive circuit

## APPLICATION

They are used in air quality control equipments for buildings/offices, are suitable for detecting of NH<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, alcohol, Benzene, smoke, CO<sub>2</sub>, etc.

## SPECIFICATIONS

### A. Standard work condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
V <sub>c</sub>	Circuit voltage	5V±0.1	AC OR DC
V <sub>H</sub>	Heating voltage	5V±0.1	AC OR DC
R <sub>L</sub>	Load resistance	can adjust	
R <sub>H</sub>	Heater resistance	33Ω±5%	Room Tem
P <sub>H</sub>	Heating consumption	less than 800mw	

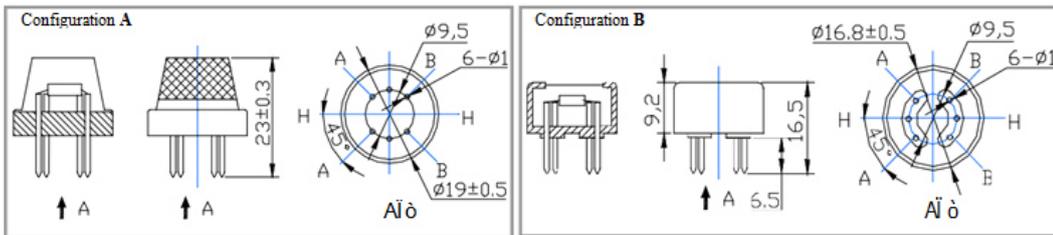
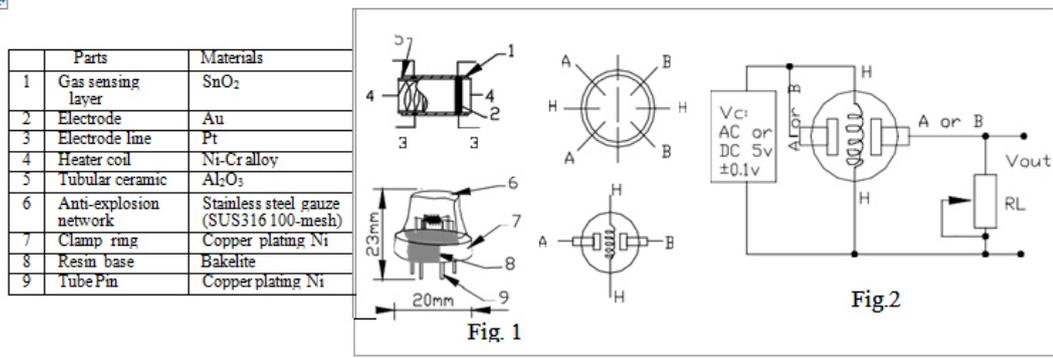
### B. Environment condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
T <sub>ao</sub>	Using Tem	-10 -45	
T <sub>as</sub>	Storage Tem	-20 -70	
R <sub>H</sub>	Related humidity	less than 95%Rh	
O <sub>2</sub>	Oxygen concentration	21%(standard condition)Oxygen concentration can affect sensitivity	minimum value is over 2%

### C. Sensitivity characteristic

Symbol	Parameter name	Technical parameter	Remark 2
R <sub>s</sub>	Sensing Resistance	30KΩ-200KΩ (100ppm NH <sub>3</sub> )	Detecting concentration scope 10ppm-300ppm NH <sub>3</sub> 10ppm-1000ppm Benzene 10ppm-300ppm Alcohol
α (200/50) NH <sub>3</sub>	Concentration Slope rate	≤0.65	
Standard Detecting Condition	Temp: 20 ±2 V <sub>c</sub> :5V±0.1 Humidity: 65%±5% V <sub>h</sub> : 5V±0.1		
Preheat time	Over 24 hour		

### D. Structure and configuration, basic measuring circuit



Structure and configuration of MQ-135 gas sensor is shown as Fig. 1 (Configuration A or B), sensor composed by micro Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic tube, Tin Dioxide (SnO<sub>2</sub>) sensitive layer, measuring electrode and heater are fixed into a crust made by plastic and stainless steel net. The heater provides necessary work conditions for work of sensitive

components. The enveloped MQ-135 have 6 pin ,4 of them are used to fetch signals, and other 2 are used for providing heating current.

Electric parameter measurement circuit is shown as Fig.2

### E. Sensitivity characteristic curve

Fig.2 sensitivity characteristics of the MQ-135

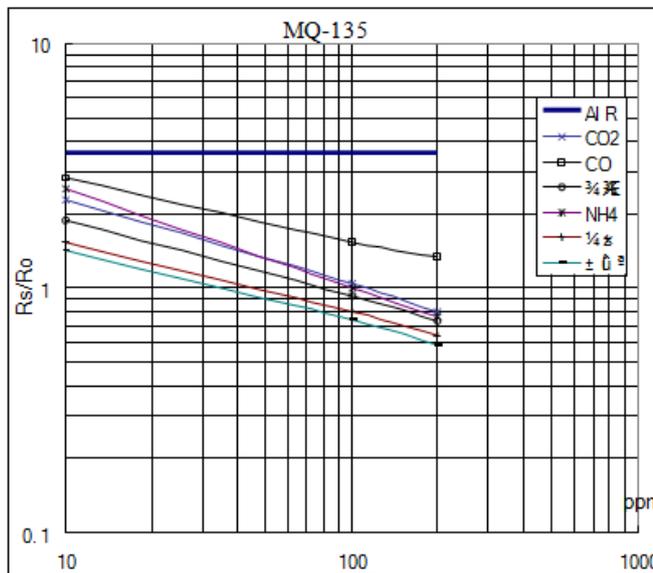


Fig.3 is shows the typical sensitivity characteristics of the MQ-135 for several gases. in their: Temp: 20 Humidity: 65% O<sub>2</sub> concentration 21% RL=20kΩ Ro: sensor resistance at 100ppm of NH<sub>3</sub> in the clean air. Rs: sensor resistance at various concentrations of gases.

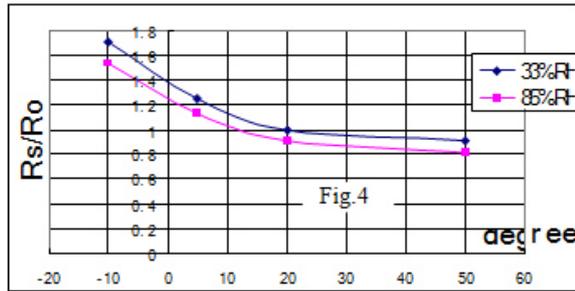
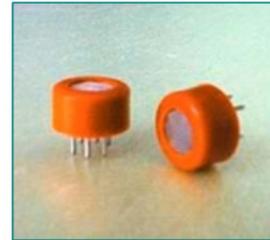


Fig.4 is shows the typical dependence of the MQ-135 on temperature and humidity. Ro: sensor resistance at 100ppm of NH<sub>3</sub> in air at 33%RH and 20 degree. Rs: sensor resistance at 100ppm of NH<sub>3</sub> at different temperatures and humidities.

### SENSITIVITY ADJUSTMENT

Resistance value of MQ-135 is difference to various kinds and various concentration gases. So, When using this components, sensitivity adjustment is very necessary. we recommend that you calibrate the detector for 100ppm NH<sub>3</sub> or 50ppm Alcohol concentration in air and use value of Load resistance that( R<sub>L</sub>) about 20 KΩ(10KΩ to 47 KΩ).

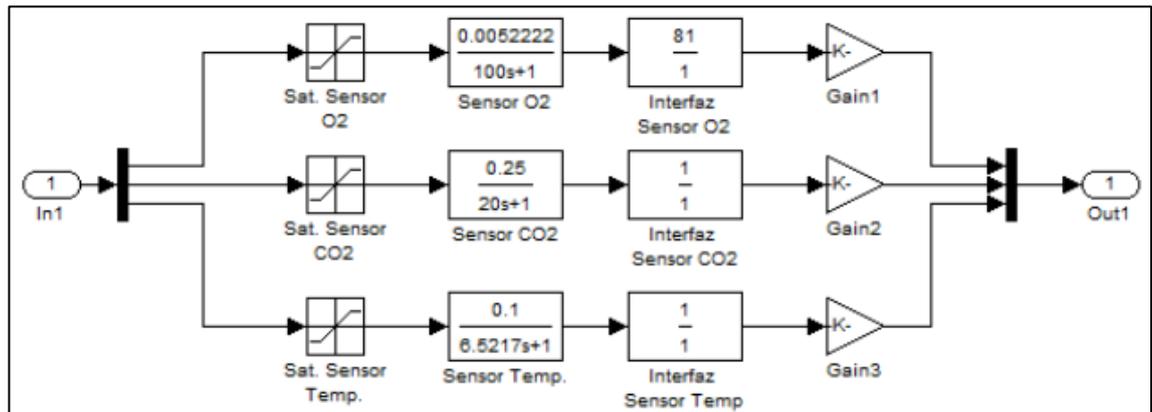
When accurately measuring, the proper alarm point for the gas detector should be determined after considering the temperature and humidity influence.





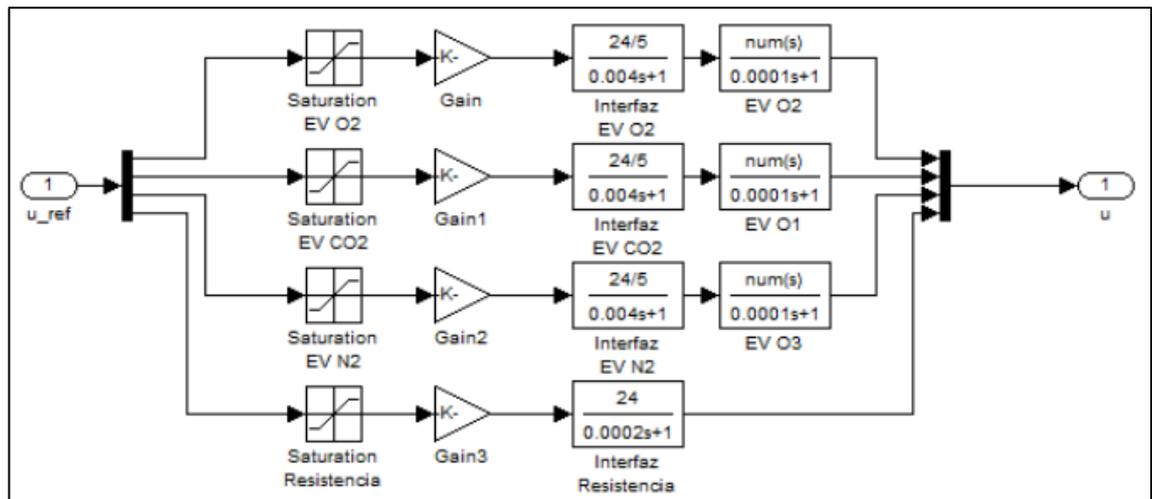
**Figura 2**

*Subsistema “sensores”*



**Figura 3**

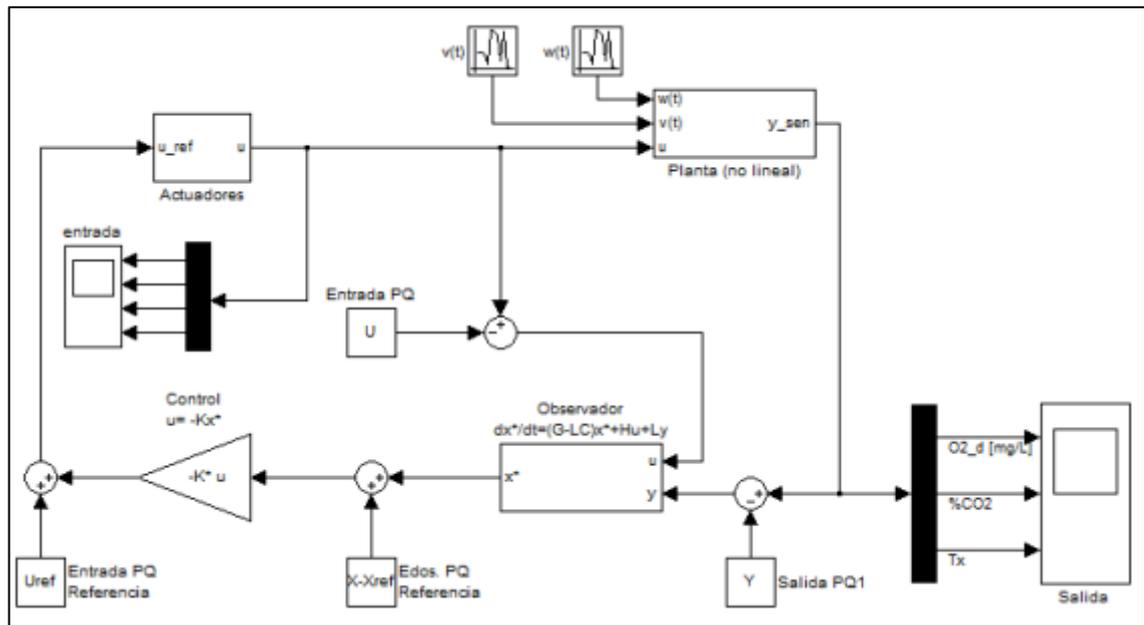
*Subsistema “actuadores”*



El sistema no lineal del regulador se elaboró en base a un modelado linealizado y discretizado de un sistema no lineal entorno a un determinado punto de equilibrio. Y la comprobación de la validez del regulador fue necesario probarlo utilizando el sistema no lineal tal como se muestra en la Figura 4.

**Figura 4**

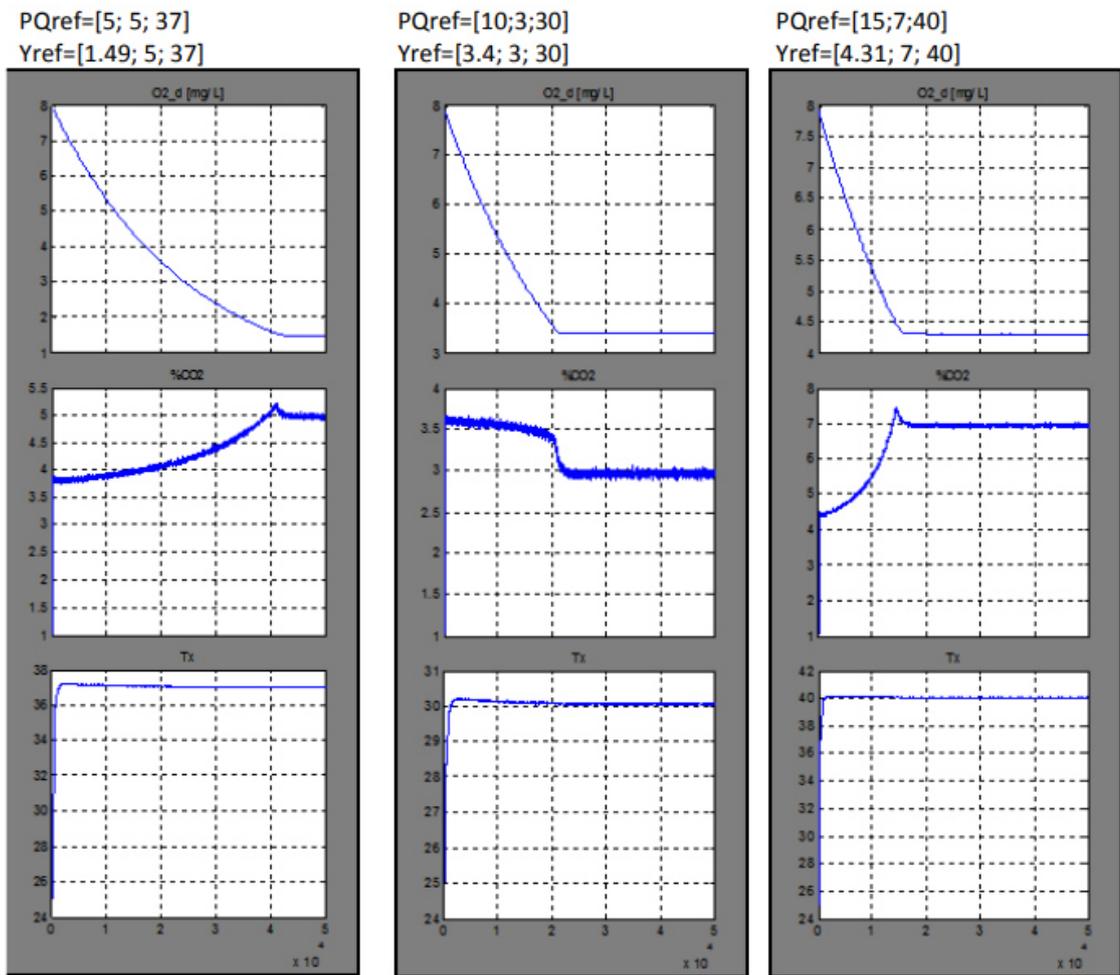
*Regulador en sistema no lineal.*



En la Figura 5 se muestra la salida del sistema para puntos de equilibrio comunes para este tipo de experimentos, en la Figura 6 se puede observar el comportamiento del sistema para puntos de equilibrio extremos, en ambos casos el regulador funciona, el regulador fue diseñado para trabajar en el punto de equilibrio: PQ = (10% O<sub>2\_gas</sub>; 5% CO<sub>2\_gas</sub>).

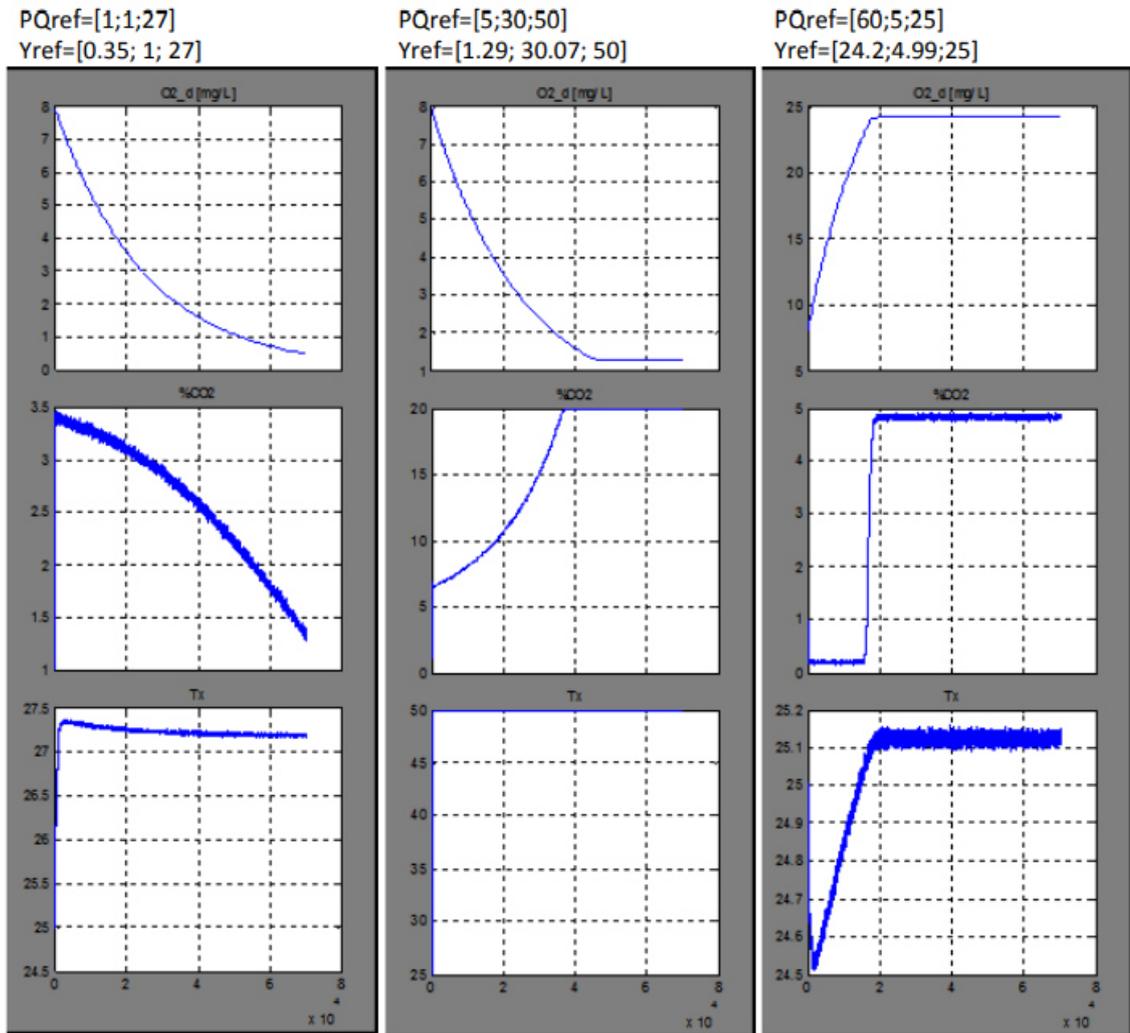
### Figura 5

Puntos de equilibrio usuales. Salida del sistema no lineal con regulador.



**Figura 6**

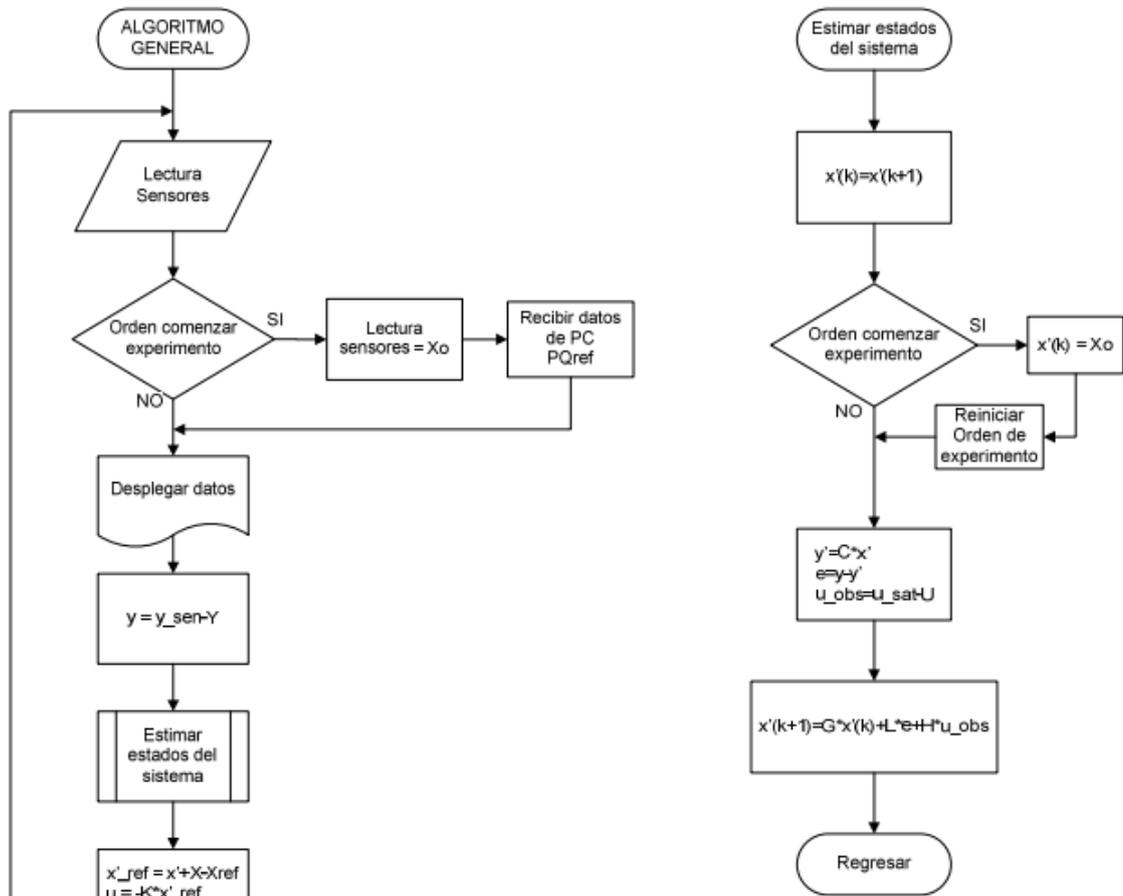
*Puntos de equilibrio extremos. Salida del sistema no lineal con regulador.*

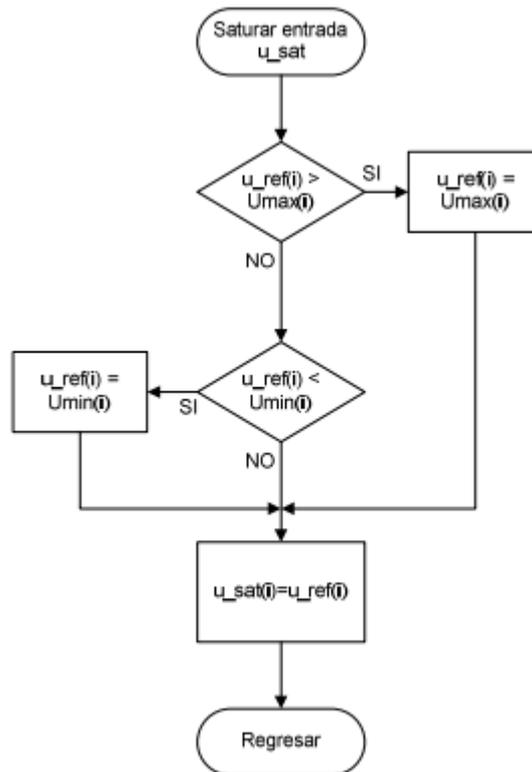


“El regulador ha sido simulado mediante un modelo analógico en tiempo discreto en Simulink de Matlab, se desarrolló un algoritmo general que realizará las funciones necesarias para controlar la cámara (Figura 7) en un bloque de función embebida para probar el funcionamiento”.

**Figura 7**

Algoritmo general del control

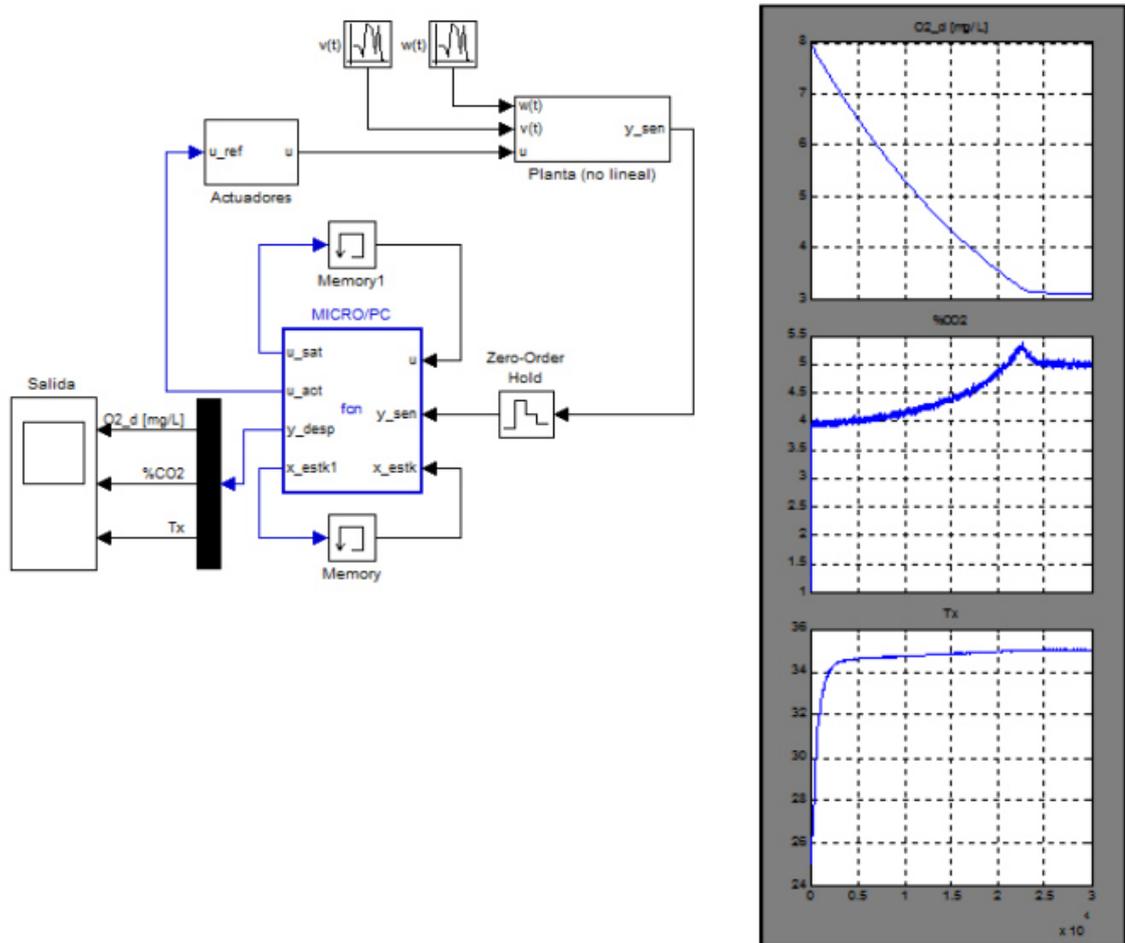




En la Figura 8 se observa la implementación del algoritmo general de control al sistema no lineal. Así mismo, se aprecia que la forma en que se implementaron la incrementación en diferencias de “x \_ estimada” y “u”, a través del uso de un bloque de memoria. En el microcontrolador, este será sustituido, el valor se almacenó en la memoria, para la respectiva recuperación en la siguiente repetición. En la misma figura también se observa la salida del sistema de punto de equilibrio, la salida referencial es  $Y_{ref} = (3.11 \text{ mg/L}; 5\%; 35^\circ \text{ C})$ , alcanzando el equilibrio.

**Figura 8**

*Implementación del algoritmo de control utilizando un bloque de función embebida Matlab.*



## Anexo C

### Comparativo y elección de sensores

#### 1 Parámetros de sensores CO<sub>2</sub>

Variable de calibración: Concentración del CO<sub>2</sub>

##### **SENSOR CO<sub>2</sub> MH-Z19C**

---

###### **SENSOR CO<sub>2</sub> MH-Z19C**

---

Gas detectado	CO <sub>2</sub>
Voltaje de alimentación	5.0 VDC
Corriente media	<40 Ma
Corriente pico	125 Ma
Rango de detección	400 a 5000 ppm
Temperatura de operación	-10 C a 50 C
Tiempo de respuesta	<120s
Interfaces de salida	UART (TTL a 3.3V); PWM

---

Características de prueba del sensor CO<sub>2</sub> MH-Z19C se indican en el capítulo de resultados.

##### **SENSOR CO<sub>2</sub> – MQ7**

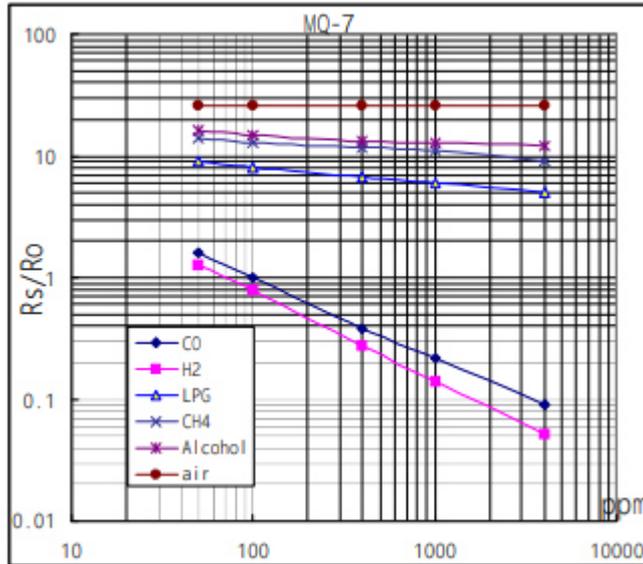
---

###### **SENSOR CO<sub>2</sub> MQ-7**

---

Gas detectado	CO <sub>2</sub>
Voltaje de alimentación	5.0 VDC
Corriente media	<40 Ma
Corriente pico	125 Ma
Rango de detección	20 a 2000 ppm
Temperatura de operación	-20 C a 50 C
Tiempo de respuesta	<90s
Interfaces de salida	UART

---



Curva de las características de sensibilidad sensor CO<sub>2</sub> MQ-7:

Temperatura: 20°C

Humedad: 65%

Concentración de O<sub>2</sub>: 21%

Ro: sensor de resistencia en 100 ppm

### SENSOR CO<sub>2</sub>-MG811

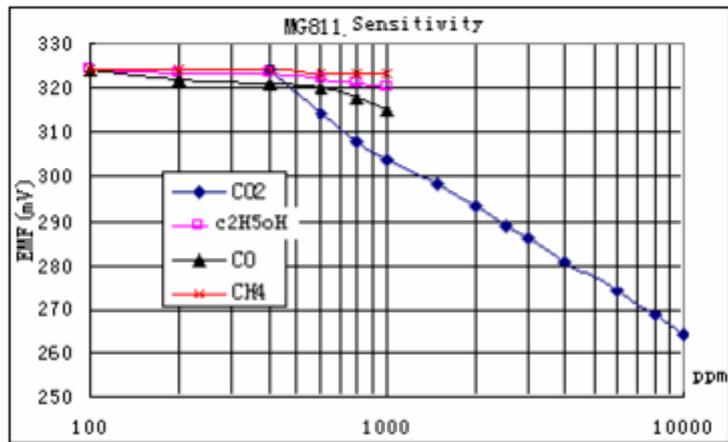
---

#### SENSOR CO<sub>2</sub> MG811

---

Gas detectado	CO <sub>2</sub>
Voltaje de alimentación	3.7 - 5.0 VDC
Corriente media	<40 Ma
Corriente pico	125 Ma
Rango de detección	100 a 10000 ppm
Temperatura de operación	-20 C a 50 C
Tiempo de respuesta	<20s
Interfaces de salida	PWM

---



Curva de características de sensibilidad sensor CO<sub>2</sub> – MG811

Temperatura: 28°C

Humedad: 65%

Concentración de O<sub>2</sub>: 21%

## SENSOR CO<sub>2</sub> – MHZ16

---

SENSOR CO <sub>2</sub> MH-Z16	
Gas detectado	CO <sub>2</sub>
Voltaje de alimentación	4.5 - 5.5 VDC
Corriente media	<85 Ma
Corriente pico	125 Ma
Rango de detección	400 a 5000 ppm
Temperatura de operación	0 C a 50 C
Tiempo de respuesta	<30s
Interfaces de salida	PWM - UART

---

### Conclusión

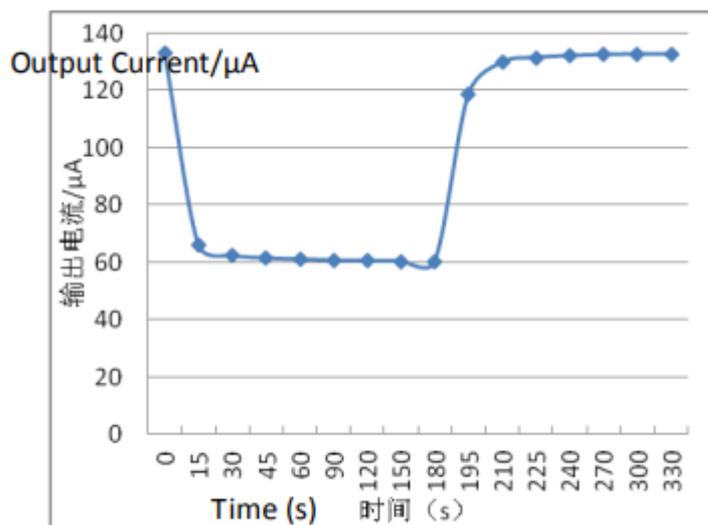
Para la elección del sensor de CO<sub>2</sub> y considerando los parámetros obtenidos en la medición, para la presente investigación se ha elegido utilizar el sensor CO<sub>2</sub> modelo: MH-Z19C, debido a que el voltaje de prueba resultó 3.26V, en condición atmosférica 0.33 al aire libre de CO<sub>2</sub>, y en el recipiente lleno de aliento – 3.26V, con 330 ppm y 3260 ppm respectivamente, favorable para los resultados de la investigación.

## 2 Parámetro de sensores concentración de Oxígeno

Variable de medida: Concentración de Oxígeno

### Sensor ME2-02

Variable medida	Concentración de oxígeno
Rango de medición	0 a 25% en volúmen
Tiempo de respuesta	<15 s
Resistencia de la carga	10 K ohms



Características de sensibilidad, respuesta y señal de salida.

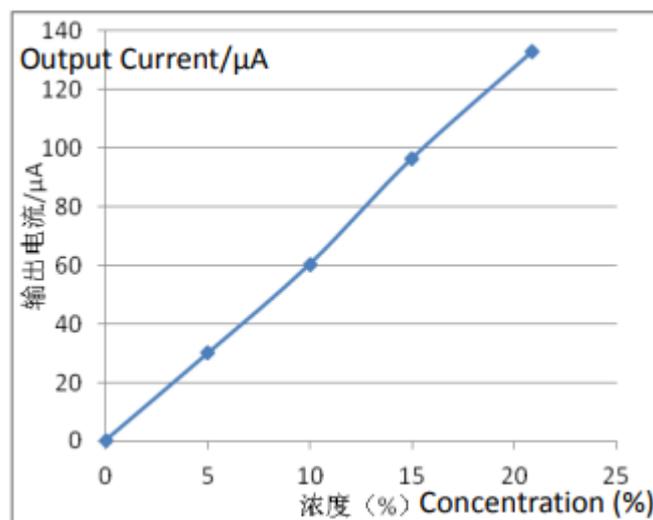


Gráfico de datos de características de linealidad de concentración

El sensor ME2-02 no considera solventes orgánicos, recubrimientos, medicamentos, aceites y gases de alta concentración.

### **Sensor de oxígeno Ventis MX4 - MPN-17134461**

Variable medida	Concentración de oxígeno
Rango de medición	0 a 30% en volumen
Tiempo de respuesta	<15 s
Resolución	0.1 %
Tipo	Electromecánico

### **Conclusión**

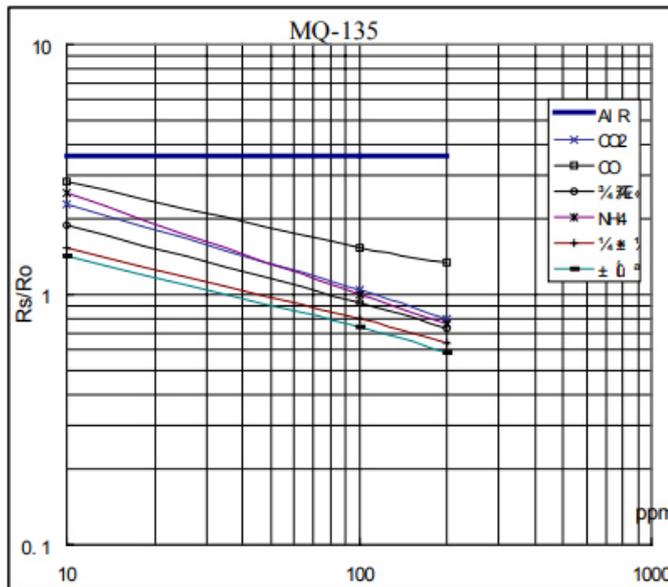
De los resultados de calibración del sensor de concentración de oxígeno en el aire limpio y en un recipiente lleno de CO<sub>2</sub> y otro con alcohol permanente se obtuvo una relación directamente proporcional entre la concentración de oxígeno y la corriente, Por lo tanto se ha elegido la utilización del sensor de concentración de CO<sub>2</sub> ME2-02 para el desarrollo de la investigación.

### 3 Parámetro de sensores calidad de aire

Variable de medida: Concentración de gas en la atmósfera

#### Sensor de gas calidad de aire MQ-135

Variable medida	Concentración de gases en la atmósfera
Voltaje de alimentación	5 VDC
Potencia consumida	<800 Mw
Resistencia de la carga	Ajustable
Rango de medición	10-1000 ppm
Concentración de oxígeno recomendada	21%



En la figura anterior se muestra el típico características de sensibilidad del sensor MQ-135 para varios gases. en su:

Temp: 20

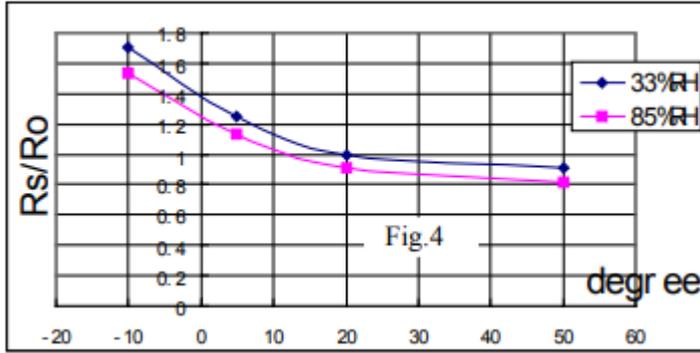
Humedad: 65%

Concentración de O<sub>2</sub> 21%

RL=20kΩ

Ro: resistencia del sensor a 100 ppm de NH<sub>3</sub> en el aire limpio.

Rs: resistencia del sensor en varias concentraciones de gases.



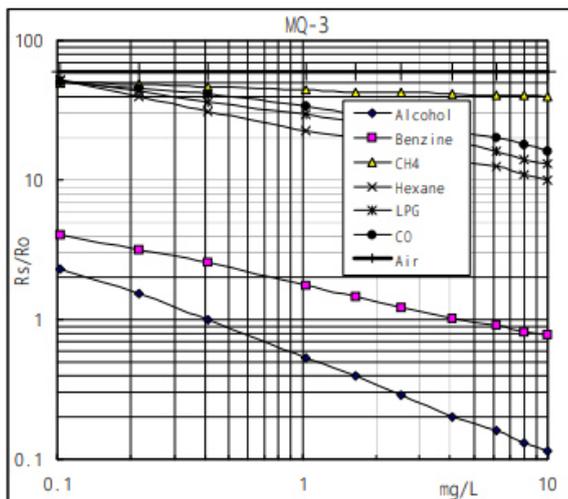
En la figura anterior se muestra la dependencia típica del MQ-135 en temperatura y humedad.

Ro: resistencia del sensor a 100 ppm de NH3 en aire a 33% HR y 20 grados.

Rs: resistencia del sensor a 100 ppm de NH3 a diferentes temperaturas y humedades.

### Sensor MQ-3 Gas Alcohol

Variable medida	Concentración de alcohol
Voltaje de alimentación	5 VDC
Potencia consumida	<750 Mw
Resistencia de la carga	Ajustable
Rango de medición	200 ppm
Concentración de oxígeno recomendada	21%



Características de sensibilidad del sensor MQ-3 para diferentes gases.

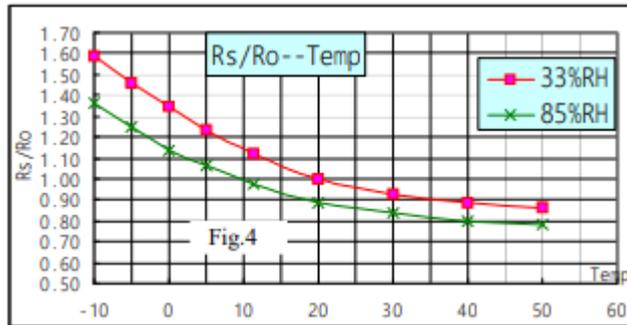
Temperatura: 20° C

Humedad: 65%

Concentración de O<sub>2</sub>: 21%

R<sub>0</sub>: 0.4 mg/L de alcohol en el aire

R<sub>s</sub>: Resistencia del sensor en concentración de diferentes gases



Dependencia del sensor MQ-3 de temperatura y humedad.

R<sub>0</sub>: resistencia del sensor a 0,4 mg/L de Alcohol en aire a 33% HR y 20 °C

R<sub>s</sub>: resistencia del sensor a 0,4 mg/L de Alcohol a diferentes temperaturas. y humedades.

### Conclusión

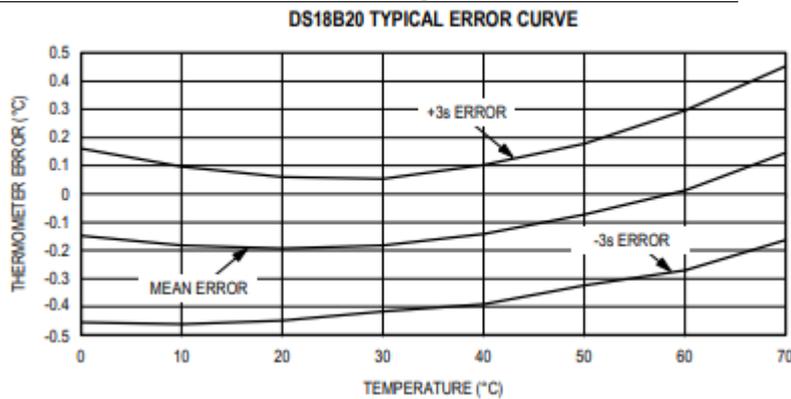
Debido a la existencia de sensores no compatibles con tarjetas Arduino, para la presente investigación se ha considerado la utilización del sensor de calidad de aire MQ 135, para la operación adecuada se ha regularizado el potenciómetro a 20K ohms con una concentración de oxígeno atmosférico 21% aproximadamente.

#### 4 Parámetro de sensores de temperatura.

Variable de medida: Temperatura

##### Sensor de temperatura DS18B20

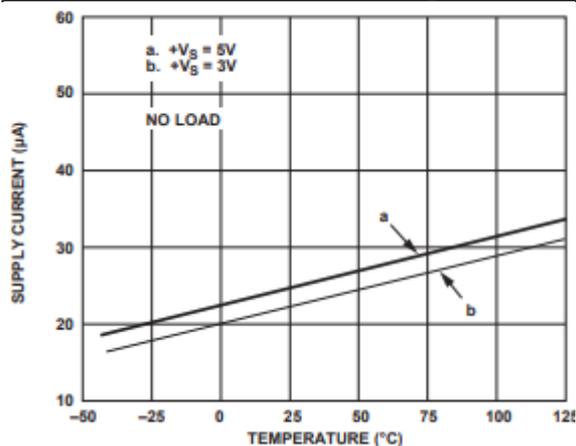
Variable medida	Temperatura
Rango de medición	-50 a 125° C
Precisión	+0.5 °C en el rango -10 , 85 °C
Alimentación	3.0 a 5.5V
Comunicación	Serial por PIN Data



Curva típica de rendimiento del sensor de temperatura DS18B20

##### Sensor de temperatura TMP35

Variable medida	Temperatura
Rango de medición	-40 a 125° C
Precisión	+0.5 °C en el rango -10 , 85 °C
Alimentación	2.7 a 5.5V
Comunicación	Serial por PIN Data GND



Curva de rendimiento de suministro de corriente y temperatura.

## **Conclusión**

Para la presente investigación, se ha elegido la utilización del sensor de temperatura DS18B20, debido al espectro más amplio en el rango de medición, es decir desde -50 °C a 125 °C con respecto a otros similar con rango de medición desde -40 °C a 125 °C respectivamente, así mismo, por la compatibilidad con la tarjeta Raspberry RPI. Se observó también, un error promedio de 1.5°C relativo, siendo mayor para temperaturas bajas y menor para temperaturas elevadas.

## Anexo D

### Parámetros y especificaciones técnicas de componentes

**Tabla 19**

*Electroválvulas de control 2/2 NC: modelo (cat. No.) SC8296A006-3. Marca ASCO*

Construcción	
Cuerpo	PEEK (polyether ether ketone)
Asiento	FFKM (Perfluor elastomer)
Fuelle de estanqueidad	PTFE (polytetrafluoroethylene - Teflón)

Características eléctricas	
Voltaje	20 – 25 [VDC]
Potencia de consumo	9 [W]
Corriente de avalancha (duración 72 ms.)	3.2 [A]
Índice de ciclo de trabajo	Continuo
Tiempo de respuesta	20 [ms]
Aislamiento de bobina	Clase F
Conexión eléctrica	DIN 46244

Especificaciones							
Puertos	Tamaño de orificio [mm]	Cv Factor de flujo	Diferencia de presión [bar]			Potencia [W]	Peso [Kg]
			Min.	Max.			
				Gases	Líquidos		
¼ NPT	3.9878	0.38	0	3.99	3.99	9	0.4252

**Tabla 20**

*Válvula check: modelo (cat. No) V012 005 – 3, marca ASCO.*

Construcción	
Cuerpo	Acero inoxidable 300
Asiento	NBR (nitrile rubber)

Especificaciones					
Puertos	Tamaño de orificio [mm]	Cv / Kv Factor de flujo	Presión de operación [bar]	Diferencia de presión [bar]	
				Min.	Max.
¼ NPT	7	0.7 / 0.6	0.07	0	10

**Tabla 21**

*Sensor galvánico de oxígeno disuelto: modelo ME2*

Características	
Tipo de medición	Presión parcial de oxígeno en la muestra
Periodo de calentamiento	No requerido
Membrana	HDPE (High-density polyethylene)
Material del cuerpo	Epoxy, Noryl
Tipo de calibración	Punto único en aire
Conector	BNC
	Pin central: cátodo (+) Carcasa: ánodo (-)

Especificaciones		
Rango	0 – 20 [mg/L]	
Exactitud	+ 2 % cuando temp. medida = temp. calibración	
Temperatura máxima	0 – 50 °C	
Compensación de temperatura y salinidad *	Tabla de corrección del fabricante	
Corrección de presión	DOppm=DOppm (de tabla) * presión barométrica [mmHg]/760[mmHg]	
Salida	100% saturación	47 ± 9 [mV]
	0% saturación	< 1 [mV]
Relación de flujo del fluido	Min. 5 [cm/s] a través de la membrana	
Tiempo de respuesta	Después del equilibrio, 1 minuto para 2 [mV]	
	5 minutos para alcanzar 95% de la lectura final	

**Tabla 22**

*Sensor de dióxido de carbono gaseoso: Modulo para dióxido de carbono modelo MQ 135*

Características	
Tipo de medición	Porcentaje de CO <sub>2</sub> Diferentes opciones de rangos
Periodo de calentamiento	Requerido
Sensor	CARBOCAP sensor infrarrojo no-dispersivo (NDIR). Partes críticas hechas de silicón, lo que le da gran estabilidad a través del tiempo y la temperatura
Material del cuerpo	Policarbonato
Probeta	IP65 protegida en contra de polvo y vapor de agua. Intercambiable
Conector	Terminales de tornillo

Especificaciones	
Rango	0 – 2 %, 0 – 3 %, 0 – 5 %, 0 – 10 %, 0 – 20 %
Exactitud	@ 25°C, ± 1.5 % del rango + 2 % de lectura
Estabilidad (tiempo)	< ±5 % de escala completa cada 2 años
Temperatura de operación	-20 a 60 °C
Humedad relativa de operación	Probeta: 0 – 100 % (sin condensar) Tarjeta madre: 0 – 85 % (sin condensar)
Dependencia de temperatura	-0.3 % de lectura /°C
Presión de operación	0.7 – 1.3 [bar]
Dependencia de presión	+0.15 % de lectura /[hPa]
Tiempo de calentamiento	30 [s], 15 [min]
Salida	0 – 20, 4 – 20 [mA]
	0 – 1, 0 – 2, 0 – 2.5, 0 – 5 [V]
	12 bits
Carga externa recomendada	Salida de corriente: max. 200 [Ω]
	Salida de voltaje: max. 1000 [Ω]
Voltaje de operación	11 – 20, 18 – 30 [VDC]
Consumo	< 2.5 [W]
Tiempo de respuesta (63%)	20 [s]

**Tabla 23***Sensor de humedad y temperatura\_ modelo DS18B20*

Características	
Tipo de medición	Porcentaje de humedad relativa Temperatura en grados centígrados
Periodo de calentamiento	Requerido
Sensor	Humedad: capacitor polimérico de lámina delgada Temperatura: Termómetro de resistencia (RTD) PT 100Ω DIN 43760, IEC751
Calibración	En sitio con tornillos Dos puntos (cero y span)
Carcasa	Plástico ABS IP65 protegida en contra de polvo y vapor de agua.
Conector	Nylon resistente a líquidos

Especificaciones	
Rango	Humedad: 0 – 100 % @ 0 – 50 °C
	Temperatura: 0 – 50 °C
Exactitud	@ 25°C, ± 2 %RH, ± 0.3 °C
Estabilidad (tiempo)	1 % RH por año
Temperatura de operación	-40 a 85 °C
Humedad de operación	Resistente al agua (no sumergible)
Dependencia de temperatura	± 0.008 %RH/°C (efecto @ 0 %RH)
Salida	Humedad: 4 – 20 [mA], 0 – 5 [V]
	Temperatura: 4 – 20 [mA], 0 – 5 [V]
Voltaje de operación	12 – 36 [VDC]
Corriente (max.)	500 [mA]
Tiempo de respuesta (90%)	< 15 [s] @ 25°C, velocidad del aire 0.5 [m/s]

**Tabla 24***Resistencia tipo cartucho: a medida*

Construcción	
Hilo calefactor Níquel – Cromo 80/20	
Núcleo cerámico	
Relleno de óxido de magnesio	
Recubrimiento de acero inoxidable	
Disco cerámico de aislamiento	
Cable conductor, terminal flexible	
Disipador de aluminio	

Especificaciones	
Intensidad calorífica	19 [W/cm <sup>2</sup> ]
Potencia	550 [W] (+ 5% - 10%)
Corriente de fuga (en frío)	≤ 5 [mA] @ 500 [V]
Temperatura de trabajo	350 °C max.
Voltaje de operación	120 [VAC]

**Tabla 25**

*Tanques de suministro de gases y válvula reguladora INFRA*

	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Código	34161	32050	32150
Pureza mínima	99.9.998%	99.99% (fase líquida)	99.9995%
Tipo de cilindro	A	B	A
Contenido	9.6 m <sup>3</sup> (12.7 Kg)	25 Kg (13 m <sup>3</sup> )	9.54 m <sup>3</sup> (11 Kg)
Válvula	CGA – 540	CGA – 320	CGA – 580
Regulador	2123351-01-CGA (E12-244 D)	2123351-01-CGA (E12-244 D)	2123351-01-CGA (E12-244D)
Uso	Espectrometría por absorción atómica.	Atmósfera controlada, conteo genético, cultivos microbianos y bacterianos.	Gas de arrastre en cromatografía de gases
Identificación			

Especificaciones Regulador 2123351-01-CGA, marca: CONCOA						
XXX	A		B	C	D	-Inlet
Serie	Presión de salida	Manómetro de salida	Manómetro de entrada	Ensamble de salida	Ensamble de manómetros	Conexión de entrada
212	3		3	5	1	-01 CGA
	0 – 120 psig	0 – 200 psig	0 – 4000 psig	Válvula de aguja ¼" MPT	Estándar (bar/psig manómetros)	¼" FPT CGA

**Tabla 26**

*Ventilador: modelo VN6A, marca STEREN*

Características	
Cuerpo de plástico	
Uso general	

Especificaciones	
Dimensiones	12 x 12 x 2.54 [cm]
Voltaje de operación	12 [VDC]
Potencia	4.5 [W]

RPM	3000
-----	------

**Tabla 27**

*Microcontrolador: modelo PIC18F452, MICROCHIP*

Especificaciones	
Frecuencia de operación	40 MHz
Canales convertidor A/D	8 (10 bits)
I/O Pins	33
	26 funciones compartidas 7 terminales dedicadas
Flash interno	32 [Kbyte]
RAM	1536 [bytes]
Captura/Comparación/PWM	2 CCP
Comunicaciones	1-A/E/USART, 1-MSSP(SPI/12C)
Suministro de corriente (max.)	25 [mA]
Funciones del timer	Input capture, output compare, PWM
Número de timers	1 (8 bits), 3 (16 bits)

**Tabla 28**

*LEDs indicadores rojo y verde. 3 mm.*

Especificaciones	
Voltaje de operación	2.1 [VDC]
Potencia	21 [mW]
Corriente	10 [mA]

## Parámetros de señales

**Tabla 29**

*Amplificador operacional CMOS\_ Modelo OPA333*

PARAMETRO	MIN	TÍPICO	MAX	UNIDAD
Voltaje de Offset ( $V_{OS}$ )		2	10	$\mu\text{V}$
Corriente de entrada Bias ( $I_B$ )		$\pm 70$	$\pm 200$	$\text{pA}$
Rango de voltaje de entrada (Modo común)	(V-) -0.1	-	(V+) +0.1	V
Voltaje de suministro ( $V_S$ )	1.8		5.5	V
Corriente por amplificador ( $I_Q$ )		17	25	$\mu\text{A}$

**Diagrama de conexiones**

**Tabla 30**

*Amplificadores operacionales (circuito integrado de 4 OA): modelo LM6132.*

PARAMETRO	MIN	TÍPICO	MAX	UNIDAD
Voltaje de Offset ( $V_{OS}$ )		0.25		mV
Corriente de entrada Bias ( $I_B$ )		110	180	nA
Rango de voltaje de entrada (Modo común)	-0.25	-	+5.25	V
Voltaje de suministro ( $V_S$ )	-	5 a 30	32	V
Corriente de suministro			0.45	mA
Voltaje de salida ( $V_S = 5\text{V}$ @ carga = $100\text{k}\Omega$ )		0.007 – 4.992		V
Corriente de suministro de salida		360	450	$\mu\text{A}$

**Diagrama de conexiones**

**Tabla 31**

*Relevador I/O (PVR): modelo ODC4/15-L, marca Panasonic*

PARAMETRO	MIN	TÍPICO	MAX	UNIDAD
Voltaje lógico de entrada	4		15	V
Impedancia de entrada		1.7		kΩ
Voltaje de carga	3		60	V
Corriente de carga			2	A
Pico de corriente "no-repetitiva" (duración 1 s.)			5	A
Tiempo de encendido			0.5	ms
Tiempo de apagado			2	ms
Corriente de fuga			1	mA
Voltaje "on-state"			1.6	V

Diagrama interno y de conexiones

**Tabla 32**

*Convertidor digital – analógico (DAC): modelo MAX5839, marca MAXIM*

PARAMETRO	MIN	TÍPICO	MAX	UNIDAD
Resolución	13			Bits
Entradas de referencia				
- REF (+)	0.5		4.5	V
- REF (-)	-2		-0.5	V
- Rango de REF	2		6.5	V
Salidas Analógicas				
- Voltaje max. de salida	9	Vdd-2		V
- Voltaje min. de salida		Vss+2	-4	V
DUTGND	-2		2	V
Entradas digitales				
- Voltaje de entrada "alto"	2.4			V
- Voltaje de entrada "bajo"			0.8	V
Voltaje de alimentación				
- Vdd, alimentación analógica	7		14	V
- Vss, rango de alimentación analógica	-9		-5	V
- Vcc, alimentación digital	4.75	5	5.25	V
- Idd, corriente de alimentación analógica positiva		10	13	mA
- Iss, corriente de alimentación analógica negativa		9	12	mA

- Icc, corriente de alimentación digital								5	mA
DIRRECCION DE CANALES				TABLA DE VERDAD					
<b>A2</b>	<b>A1</b>	<b>A0</b>	<b>FUNCTION</b>	<b>CLR</b>	<b>LD</b>	<b>WR</b>	<b>CS</b>	<b>FUNCTION</b>	
0	0	0	DAC A input latch	X	X	0	0	Input register transparent	
0	0	1	DAC B input latch	X	X	X	1	Input register latched	
0	1	0	DAC C input latch	X	X	1	X	Input register latched	
0	1	1	DAC D input latch	X	0	X	X	DAC register transparent	
1	0	0	DAC E input latch	X	1	X	X	DAC register latched	
1	0	1	DAC F input latch	0	X	X	X	Outputs of DACs at DUTGND_ _	
1	1	0	DAC G input latch	1	1	X	X	Outputs of DACs set to voltage defined by the DAC register, the references, and the corresponding DUTGND_ _	
1	1	1	DAC H input latch						

X = Don't care

Diagrama de conexiones

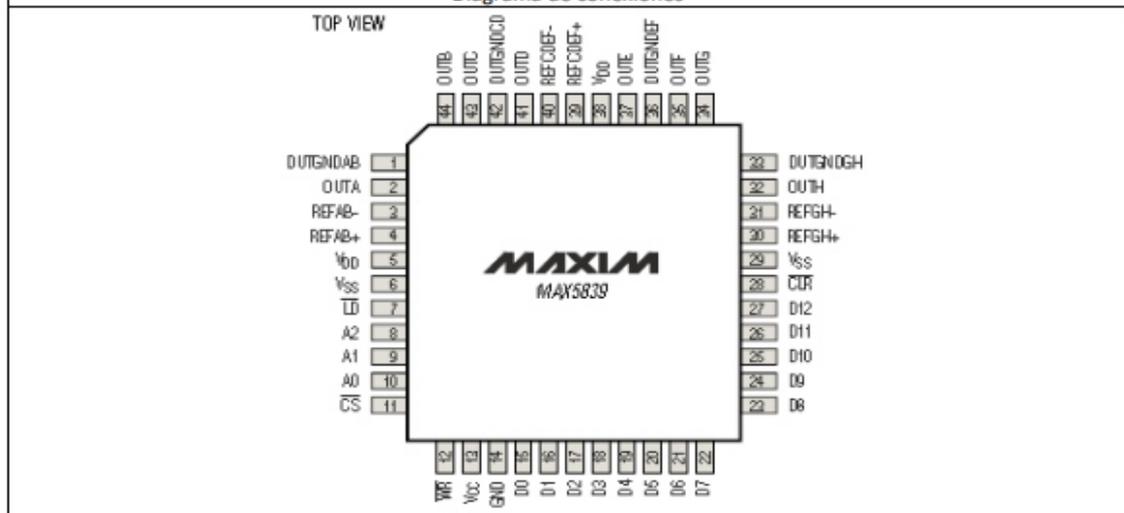
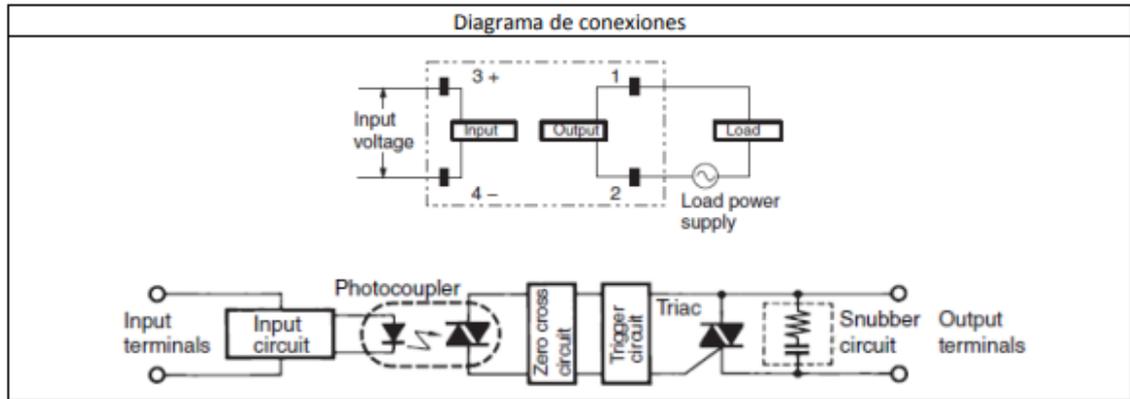


Tabla 33

Relevador estado sólido (SSR): modelo G3NE-205T-US-DC5, marca OMRON

PARAMETRO	MIN	TÍPICO	MAX	UNIDAD
Voltaje de entrada	4	5	6	VDC
Impedancia de entrada	200	250	300	$\Omega$
Voltaje de carga ( $V_L$ )	75		264	VAC
Corriente de carga ( $I_L$ )	0.1		5	A
Tiempo de encendido			1	ms
Tiempo de apagado			9	ms
Corriente de fuga			2	mA



**Tabla 34**

*Revelador de estado solido (SSR): modelo AQ1AD2-3/28VDC, marca PANASONIC*

PARAMETRO	MIN	TÍPICO	MAX	UNIDAD
Voltaje lógico de entrada	3		28	V
Impedancia de entrada		1.6		kΩ
Voltaje de carga	10		200	V
Corriente de carga			1	A
Corriente de fuga			1	mA
Pico de corriente "no-repetitivo" (durante 1 s.)			5	A
Voltaje "on-state" (a corriente de carga max.)			1.6	V

