



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y SISTEMAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



DISEÑO Y MONITORIZACIÓN DE UN SISTEMA DE
CALEFACCIÓN CON CONTROL PID BASADO EN COLECTOR
SOLAR PARA VIVIENDAS EN EL DISTRITO DE PUNO

TESIS

PRESENTADA POR:

ROLING LEOMAR MAMANI CANAHUIRI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRÓNICO

PUNO – PERÚ

2025



ROLING LEOMAR MAMANI CANAHUIRI

DISEÑO Y MONITORIZACIÓN DE UN SISTEMA DE CALEFACCIÓN CON CONTROL PID BASADO EN COLECTOR S...

My Files

My Files

Universidad Nacional del Altiplano

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::8254:513666666

202 páginas

Fecha de entrega

16 oct 2025, 10:03 a.m. GMT-5

34.090 palabras

Fecha de descarga

16 oct 2025, 10:13 a.m. GMT-5

188.148 caracteres

Nombre del archivo

5- Calidad de tesis en formato WORD.pdf

Tamaño del archivo

2.6 MB





12% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 10% Fuentes de Internet
- 2% Publicaciones
- 9% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

- Texto oculto**
163 caracteres sospechosos en N.º de página
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

.....
Christian Augusto Romero Goyzueta
INGENIERO ELECTRÓNICO
CIP 133009

.....
Euler Edson Apaza Medina
DIRECTOR DE INVESTIGACIÓN
INGENIERIA ELECTRÓNICA





**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
SISTEMAS**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**DISEÑO Y MONITORIZACION DE UN SISTEMA DE CALEFACCION CON
CONTROL PID BASADO EN COLECTOR SOLAR PARA VIVIENDAS EN EL
DISTRITO DE PUNO**

TESIS PRESENTADA POR:

ROLING LEOMAR MAMANI CANAHUIRI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRÓNICO

APROBADA POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:

PRESIDENTE:

.....
M.Sc. JASMANY RUELAS CHAMBI



PRIMER MIEMBRO:

.....
M.Sc. EDWIN WILBER CHAMBI MAMANI

SEGUNDO MIEMBRO:

.....
Ing. ESTER CAROLINA MENDOZA YARESI

ASESOR DE TESIS:

.....
M.Sc. CHRISTIAN AUGUSTO ROMERO GOZQUETA

ÁREA : Telecomunicaciones

TEMA: Automatización y monitoreo

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 17 de junio del 2025



DEDICATORIA

Dedico esta tesis de investigación a mis Padres, Hermanos y Hermana, cuyo amor, sacrificio y apoyo incondicional me han permitido llegar hasta aquí. por estar siempre en cada paso de mi formación de crecer como persona profesional. Por último, gracias a todos por su apoyo y confianza.

Roling Leomar Mamani Canahui.



AGRADECIMIENTOS

Expreso mi agradecimiento especialmente a mis padres, por su amor incondicional, por brindarme su apoyo y por hacerme creer siempre en mis capacidades. Sin su motivación, no habría sido posible completar esta tesis.

Roling Leomar Mamani Canahui.



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE ANEXOS	
ACRÓNIMOS	
RESUMEN	19
ABSTRACT.....	20
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	23
1.1.1. Descripción del problema.....	23
1.1.2. Formulación del problema	25
1.1.2.1. Problema general.....	25
1.1.2.2. Problema específico	25
1.1.3. Justificación del problema.....	25
1.1.3.1. Justificación técnica	25
1.1.3.2. Justificación económica	26
1.1.3.3. Justificación social	26
1.1.3.4. Justificación climatológica.....	27
1.1.4. Objetivos	27
1.1.4.1. Objetivo general.....	27
1.1.4.2. Objetivos específicos	27



1.1.5. Hipótesis.....	27
1.1.5.1. Hipótesis general.....	28
1.1.5.2. Hipótesis específicas	28

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES	29
2.1.1. Antecedentes internacionales	29
2.1.2. Antecedentes nacionales	30
2.2. MARCO TEÓRICO Y MARCO CONCEPTUAL.....	32
2.2.1. Energía solar térmica.....	32
2.2.2. Aplicación de la energía solar térmica	33
2.2.2.1. Producción de agua caliente.....	33
2.2.2.2. Sistema de calefacción	34
2.2.3. Clasificación de los sistemas de energía solar térmica	35
2.2.3.1. Sistema de temperatura baja	35
2.2.3.2. Sistema de temperatura alta	36
2.2.4. Energía solar fotovoltaica.....	37
2.2.5. Radiación solar.....	37
2.2.6. Tipos de colectores solares.....	38
2.2.6.1. Colectores de baja temperatura	38
2.2.6.2. Colectores de temperatura media	42
2.2.7. Fundamentos de calefacción	47
2.2.7.1. Calefacción.....	47
2.2.7.2. Confort térmico	47
2.2.7.3. Parámetros del confort térmico	49



2.2.8. Carga térmica	50
2.2.8.1. Ambiente no climatizado	51
2.2.8.2. Ambiente climatizado en verano.....	52
2.2.8.3. Ambiente climatizado en invierno	53
2.2.9. Fundamentos de sistemas de control automático	54
2.2.9.1. Control en lazo abierto.....	54
2.2.9.2. Control en lazo cerrado.....	55
2.2.10. Sistemas de control PID	55
2.2.10.1. Acción de control proporcional (P).....	56
2.2.10.2. Acción de control integral (I).....	58
2.2.10.3. Acción de control derivativo (D)	59
2.2.11. Diseño de sistemas de control proporcional integral y derivativo (PID) 60	
2.2.11.1. Diseño con el controlador proporcional derivativo (PD).....	61
2.2.11.2. Diseño con el controlador PI.....	65
2.2.11.3. Diseño con el controlador PID.....	67
2.2.12. Sintonía de controladores PID.....	68
2.2.12.1. Para sintonía de controladores PID con reglas de Ziegler- Nichols	70
2.2.12.2. Criterio para la estabilidad de Routh Hurwitz	75
2.2.12.3. Controlador PI asignación de polos	79
2.2.13. Sistemas de control digital	87
2.2.13.1. Sistemas de tiempo discreto.....	88
2.2.13.2. Denotación de los términos empleados.....	89
2.2.13.3. Muestreadores	91
2.2.13.4. Retenedores.....	93



2.2.14. Aproximación discreta de control convencionales P, PI y PID	96
2.2.14.1. Aproximación discreta de control proporcional.....	96
2.2.14.2. Aproximación discreta para control proporcional integral PI...	98
2.2.14.3. Aproximación discreta de control (PID).....	101
2.2.15. Monitorización	103
2.2.16. Programas y complementos para el desarrollo.....	104
2.2.16.1. Matlab	104
2.2.16.2. Simulink.....	105
2.2.16.3. Arduino IDE.....	105

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	107
3.1.1. Diseño de la investigación.....	107
3.1.2. Nivel de la investigación	107
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	108
3.2.1. Población.....	108
3.2.2. Muestra.....	108
3.3. INSTRUMENTOS Y TECNICAS EN LA RECOLECCIÓN DE DATOS	110
3.3.1. Técnicas.....	110
3.3.2. Instrumentos	110
3.4. PROCEDIMIENTO DEL EXPERIMENTO	111
3.5. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	112
3.6. UBICACIÓN DEL PROYECTO	112
3.7. DISEÑO DEL COLECTOR SOLAR MODULAR TÉRMICO.....	113
3.8. ANÁLISIS DEL DESARROLLO.....	118



3.8.1.	Obtención de datos de temperatura del colector solar modular	119
3.8.2.	Desarrollo para obtener la función de transferencia de la planta	119
3.8.2.1.	Modelo matemático de la planta en Matlab	120
3.8.3.	Desarrollo para la obtención del controlador PID.....	125
3.8.3.1.	Control de sintonía de Ziegler-Nichols primer método	126
3.8.3.2.	Control de sintonía de Ziegler-Nichols segundo método.....	130
3.8.3.3.	Control PID por cancelación de polos	144
3.8.3.4.	Control PID por asignación de polos	150
3.8.4.	Desarrollo del control PID en Arduino	152
3.8.4.1.	Selección del periodo de muestreo.....	155
3.8.4.2.	Desarrollo de control PID discreto para Arduino.	157
3.8.5.	Implementación del modelo de controlador PID	160
3.8.5.1.	Señales en osciloscopio del dimmer digital.	163
3.8.6.	Implementación de la monitorización	165
3.8.6.1.	Monitorización mediante plataforma web	166

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	168
4.1.1.	Para el objetivo general	168
4.1.2.	Para el primer objetivo específico.....	169
4.1.2.1.	Método de Ziegler-Nichols	169
4.1.2.2.	Método por cancelación de polos.....	171
4.1.2.3.	Método por asignación de polos	174
4.1.3.	Para el segundo objetivo específico	176
4.1.4.	Discusiones.....	179



V. CONCLUSIONES.....	183
VI. RECOMENDACIONES	186
VII. REFERENCIAS BIBIOGRÁFICAS	187
ANEXOS.....	190



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Rango de las temperaturas de locales y establecimientos.....	49
Tabla 2 Regla de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón para método 1 ...	72
Tabla 3 Sintonía de Ziegler-Nichols para la ganancia crítica K_u y periodo crítico P_u método 2.....	74
Tabla 4 Operacionalización de variables dependiente e independiente.....	112
Tabla 5 Plataforma de monitoreo en tiempo real.....	167



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1	Partes de un colector de placa plana..... 39
Figura 2	Vista transversal de un colector de tubos del tipo heat-pipe 41
Figura 3	Colector parabólico compuesto. 42
Figura 4	Estructura del colector de placa plana evacuado 43
Figura 5	Esquema de un colector cilindro parabólico 45
Figura 6	Esquema de un colector lineal Fresnel 46
Figura 7	Local que se adapta a la temperatura del ambiente 52
Figura 8	Extracción de calor o aire caliente en verano 52
Figura 9	Adición de calor en temporada de invierno..... 53
Figura 10	Elementos de un sistema de control en lazo abierto..... 54
Figura 11	Control de velocidad en ralentí en lazo cerrado 55
Figura 12	Bloque de control PID de una planta..... 56
Figura 13	Bloque de control proporcional 57
Figura 14	Comportamiento de la acción proporcional..... 57
Figura 15	Bloque de control integradora 58
Figura 16	Aproximación de series de Tylor 59
Figura 17	Sistema con control PD 61
Figura 18	Formas de onda de la señal..... 62
Figura 19	Traza de Bode $1 + KDsKP$. $KP = 1$ 64
Figura 20	Modelo de sistema con control PI 65
Figura 21	Configuración de polos y ceros de un controlador PI 66
Figura 22	Trazas de Bode del controlador PI $Gc(s)=KP + Kis$ 67
Figura 23	Respuesta al escalón del sistema con los controles PD, PI y PID 68
Figura 24	Diagrama de bloque de control PID de una planta..... 69
Figura 25	Bloque de lazo abierto con entrada de escalón unitario 71
Figura 26	Curva sigmoideal para determinar las intersecciones 72
Figura 27	Frecuencia sostenida con periodo Pu 73
Figura 28	Lazo cerrado con realimentación..... 79
Figura 29	Curva de respuesta a escalón unitario con tolerancias permitidas..... 83
Figura 30	Polos del sistema de tercer orden con cero..... 85



Figura 31	Polos en plano complejo.....	85
Figura 32	Lazo de control digital básico.....	89
Figura 33	a) Muestreador b) Señales de entrada y salida	92
Figura 34	a) Conjunto muestreador-retenedor b) Señales entrada y salida en.....	94
Figura 35	Circuito básico para muestreo y retención	96
Figura 36	Integración trapezoidal del tiempo de muestreo.....	99
Figura 37	Mapa semántico del plan de procedimiento del experimento	111
Figura 38	Ubicación del proyecto en el distrito de Puno	113
Figura 39	Módulo de colector solar plano	114
Figura 40	Diseño y medidas del módulo de colector solar plano (corte de planta). 115	
Figura 41	Corte B-B del colector solar plano	116
Figura 42	Corte A-A del colector solar plano.....	116
Figura 43	Despliegue de las partes del módulo colector solar plano.....	117
Figura 44	Prototipo del módulo diseñado de colector solar plano.....	118
Figura 45	Datos importados de Excel hacia Matlab	121
Figura 46	Importar data en System Identification	121
Figura 47	Gráfico obtenido de los datos exportados en Matlab.	122
Figura 48	Estimación del modelo de la planta.....	123
Figura 49	Resultado de la estimación del grafico al 95.55%	124
Figura 50	Data/Model estimado para la planta	125
Figura 51	Función de transferencia de la planta.	125
Figura 52	Curva de la temperatura de la celda colectora.....	127
Figura 53	Simulación del control PID en software Simulink	128
Figura 54	Parametrización de los valores obtenidos en el controlador PID	129
Figura 55	Curva de reacción del modelo de control PID.....	130
Figura 56	Esquema de lazo cerrado	131
Figura 57	Estimación del modelo de proceso con tres polos	132
Figura 58	Resultado del modelo de estimación de la planta.....	133
Figura 59	Función de transferencia para desarrollo de método Ziegler-Nichols.....	133
Figura 60	Bloque de control proporcional	134
Figura 61	Bloque en lazo cerrado con realimentación.....	134
Figura 62	Oscilación del sistema con la $KP_{critico}$ y los polos en el eje imaginario.	138
Figura 63	Plano complejo de un sistema de segundo orden	139



Figura 64	Periodo crítico del sistema Pu	139
Figura 65	Diagrama de bloque en lazo cerrado de la planta y controlador	141
Figura 66	Implementación del control PID, en Simulink	142
Figura 67	Bloque de parámetros del controlador PID.	143
Figura 68	Respuesta transitoria del sistema implementado	143
Figura 69	Bloque de control cerrada.....	146
Figura 70	Estimación del modelo de proceso	146
Figura 71	Modelo matemático estimado.....	147
Figura 72	Curva del modelo matemático estimado.	148
Figura 73	Función de transferencia estimado	148
Figura 74	Diagrama de bloque de lazo cerrado en muestras	154
Figura 75	Periodo de muestreo de una señal	155
Figura 76	Periodo de muestreo con perturbación en la señal	156
Figura 77	Espectro de frecuencia, ancho de banda $-\omega c, \omega c$	157
Figura 78	Diseño del esquemático en lazo cerrado para control PID.....	161
Figura 79	Conexionado de la etapa de control y potencia	162
Figura 80	Circuito de dimmer digital de cruce por cero	163
Figura 81	Señal de salida del pin SYNC (cruce por cero).....	163
Figura 82	Salida de potencia mínima.....	164
Figura 83	Salida de potencia al 50 % de energía.	164
Figura 84	Salida de potencia al 100% de energía.	165
Figura 85	Esquemático de la monitorización de temperatura.....	166
Figura 86	Respuesta transitoria en método de Ziegler-Nichols.....	171
Figura 87	Respuesta transitoria del método por cancelación de polos	173
Figura 88	Plano complejo, se muestra tres polos en el semiplano de estabilización.	175
Figura 89	Respuesta transitoria del método por asignación de polos	176
Figura 90	Monitorización de la temperatura de la celda colectora.	178
Figura 91	Monitorización con control PID.	178



ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1: Diseño de la celda colectora de energía térmica solar.	190
Anexo 2: Obtención de datos de temperatura mediante datalogger.....	191
Anexo 3: Implementación del controlador proporcional integral derivativo (PID).	192
Anexo 4: Implementación del monitoreo de la celda colectora de energía térmica solar.	193
Anexo 5: Desarrollo de pruebas de control y monitoreo en la celda colectora.	194
Anexo 6: Código de la datalogger para la obtención de datos de temperatura.	195
Anexo 7: Código de control PID para los tres métodos de sintonización.....	196
Anexo 8: Código para la monitorización del control PID del colector solar modular.	199
Anexo 9: Declaración jurada de autenticidad de tesis	201
Anexo 10: Autorización para el depósito de tesis o trabajo de investigación con el repositorio institucional	202



ACRÓNIMOS

A/D	: Convertidor analógico digital
CPC	: Colector parabólico compuesto
D/A	: Convertidor digital analógico
ETC	: Colector de tubo de vacío
FPC	: Colector de placa plana
FT	: Función de transferencia
IDE	: Entorno de desarrollo integrado
I2C	: Circuito integrado para control de dispositivos
NAT	: Traducción de direcciones de red
PD	: Proporcional derivativo
PI	: Proporcional integral
PID	: Proporcional integral derivativo
PV	: Variable de proceso
S/H	: Circuito de muestreo y retención
TCP	: Protocolo de control de transmisión
UDP	: Protocolo de datagramas de usuario



RESUMEN

La investigación se centró en el diseño y monitorización de un sistema de calefacción con control Proporcional, Integral y Derivativo (PID) para viviendas del distrito de Puno, con el objetivo de garantizar la monitorización y confort térmico en la vivienda. Para ello, se implementó un colector solar modular con el propósito de obtener un modelo matemático. Para la obtención de la temperatura generada, se implementó un datalogger que registró datos de temperatura durante el día en el colector solar modular. Con los datos obtenidos, se realizó el modelamiento matemático en el software MATLAB, luego se realiza la estimación de la función de transferencia (FT) de la planta y se desarrolla un controlador PID aplicando tres métodos de control. El primer método utiliza la sintonía de Ziegler-Nichols; el segundo, la cancelación de polos; y el tercero, la asignación de polos. Este desarrollo permite comparar el comportamiento de cada estrategia de control con el objetivo de determinar cuál resulta más adecuada y óptima para el control del colector solar modular. También se monitoriza en tiempo real la temperatura de la celda colectora modular y de la vivienda calefactada, verificando los cambios, se realizaron las pruebas de control con los tres métodos. El más eficiente para controlar la dinámica del sistema o proceso de calefacción de la vivienda fue el método de cancelación de polos. Este método logra controlar el sistema en un tiempo de 80 segundos, con una estabilización rápida y presenta menores sobreimpulsos de 5% al variar el set-point de 18°C a 22°C. En conclusión, es una estrategia para el control dinámico del proceso térmico en la vivienda calefactada, asegurando un desempeño más estable y óptimo según las pruebas realizadas.

Palabras clave: Calefacción Colector solar, Confort térmico, PID.



ABSTRACT

This research focused on the design and monitoring of a Proportional, Integral, and Derivative (PID) heating system for homes in the Puno district, with the goal of ensuring monitoring and thermal comfort in the home. To this end, a modular solar collector was implemented to obtain a mathematical model. To obtain the generated temperature, a datalogger was deployed that recorded temperature data throughout the day in the modular solar collector. The data obtained was used for mathematical modeling in MATLAB software, followed by an estimation of the plant's transfer function (TF), and a PID controller was developed using three control methods. The first method uses Ziegler-Nichols tuning; the second, pole cancellation; and the third, pole assignment. This development allows for a comparison of the behavior of each control strategy to determine which is most appropriate and optimal for controlling the modular solar collector. The temperature of the modular collector cell and the heated home is also monitored in real time, verifying changes. Control tests were performed using all three methods. The most efficient method for controlling the dynamics of the home's heating system or process was the pole cancellation method. This method controls the system in 80 seconds, with rapid stabilization, and presents lower overshoots of 5% when varying the set point from 18°C to 22°C. In conclusion, it is an optimal strategy for the dynamic control of the thermal process in the heated home, ensuring more stable and optimal performance, according to the tests performed.

Keywords: Solar collector heating, Thermal comfort, PID.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La investigación consiste en el diseño, construcción y control de un sistema de calefacción que permita usar el colector solar, dedicado al control de la temperatura. Se abarcarán temas relacionadas como el diseño del sistema de control electrónico y la implementación del software con el fin de automatizar el sistema.

La importancia principal del trabajo es pretender solucionar la necesidad de generar diseños propios de un sistema de calefacción que pueda ser empleado en viviendas del distrito de Puno y otros, asimismo este diseño será un elemento que dará soluciones para diversas aplicaciones de calefacción, en contrarrestar las bajas temperaturas que se dan en esta parte del altiplano.

Para aprovechar la disponibilidad de energía solar, como complemento, a los que ya existen para dimensionar un sistema provechoso de la energía solar, mediante el uso de ajuste de colectores solares planos que estén conectados en serie, paralelo o mixto, lo que conlleva en la estimación de la energía útil y temperaturas que puede obtenerse de un dimensionamiento dado, en un colector solar no se tiene control sobre las principales variables que determinan la proporción de energía útil obtenible y la temperatura de salida del colector. Las variables no controlables son la irradiación solar, temperatura del entorno y temperatura de entrada del colector. Ante la exigencia de poder predecir cuanta energía térmica se puede alcanzar de un colector solar plano, por lo habitual se cuenta exactamente con información limitada respecto al funcionamiento del colector bajo diferentes condiciones de ejecución.



Colectores de placa plana se vienen usando de una forma eficiente para calentar aire y líquidos como agua y para la calefacción de viviendas, piscinas y otras. Los sistemas clásicos para calefacción de habitaciones emplean colectores fijos, instalados sobre el tejado o techo de viviendas.

La técnica de investigación a implementarse para este sistema está fundamentada en un enfoque cuantitativo con diseño experimental porque las variables independientes se obtienen de la naturaleza del entorno de estudio y no se podrá manipular por parte del investigador, la línea de investigación es el control automático y monitorización, asimismo comprende en varias etapas. Para el primer lugar, se ubica la etapa de plan de procedimiento donde utilizando discernimientos teóricos para el desarrollo de la estructura de diseño. La segunda etapa es el análisis matemático para el control PID, empleando softwares de simulación. Para la tercera etapa se tiene el análisis de la implementación del colector solar y su control. En la última etapa es la junta de estos sistemas con la monitorización del control PID del módulo colector solar.

Lo que se quiere, es dar a conocer la integración del sistema de calefacción y automatización, dicho sistema estará a su vez controlado y monitorizado, la cual una persona interactúa a través del set-point. Para ello se planteó como objetivo general: Diseño y monitorización de un sistema de calefacción con control PID basado en colector solar modular para viviendas del distrito de Puno. Como objetivos específicos planteamos él. Diseño de un sistema de calefacción con control PID basado en colector solar y la monitorización del sistema con control PID en el distrito de Puno.

El contenido se estructura en cuatro capítulos. En el Capítulo I se plantea el problema mediante preguntas orientadas a cómo llevar a cabo el diseño y la monitorización de un sistema de calefacción con control PID basado en un colector solar



modular. El Capítulo II presenta la revisión de la literatura, incluyendo los antecedentes y el marco teórico que respaldan la investigación. En el Capítulo III se detallan los materiales y métodos empleados, así como la validación de diversas fuentes de información que contribuyen al desarrollo del proyecto. Finalmente, el Capítulo IV expone los resultados obtenidos y la discusión correspondiente, producto del análisis realizado con los métodos y materiales aplicados.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1. Descripción del problema

Para esta parte de la región del país, en visto que no hay muchas aplicaciones que nos puedan resolver los problemas climatológicas de la región, se tiene una poca aplicación en esta parte de nuestra población por falta de conocimientos técnicos, teóricos entre otros, en la actualidad se viene utilizando las energías convencionales que derivan de las combustión de los hidrocarburos, utilizado para realizar diferentes controles de procesos industriales como es el caso sanitario, calefacción, iluminar ambientes, generación de energía eléctrica, entre otros, causando efectos de perturbación ecológica, también la contaminación ambiental por los desechos generados, juntamente con gasto energético y económico totalmente innecesario. Al referirse anteriormente la calefacción de una vivienda se requiere energía, es decir, consiste en elevar la temperatura de un ambiente determinado mediante la circulación de aire caliente.

Numerosas viviendas y diversos tipos de establecimientos como instalaciones industriales, piscinas, cobertizos para animales, bibliotecas, escuelas y colegios requieren mantener una temperatura ambiental adecuada que garantice el confort térmico necesario para el desarrollo de sus actividades en condiciones



de bienestar y calidad de vida. Sin embargo, estos espacios no han sido contemplados dentro de los estándares de confort térmico establecidos por las normas técnicas del Reglamento Nacional de Edificaciones del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Esta omisión representa un riesgo, ya que en la ciudad de Puno las temperaturas pueden descender por debajo de los 0 °C, lo que incrementa la probabilidad de contraer enfermedades respiratorias.

Las construcciones modernas realizadas dentro de la región de Puno y distritos, y en otras localidades aledañas, no han considerado como alternativa a la energía solar esto para mejorar las condiciones climatológicas en los meses de mayor friaje, el confort térmico y la calidad de vida en una vivienda es crucial, existen carencias para captación de la energía solar y la implementación de módulos de calentadores solares planas y colectores solares planas, al no ser aplicado adecuadamente los principios y fenómenos naturales y del transporte que presenta la transferencia de energía calorífica mediante la termodinámica y la mecánica de fluidos es la base fundamental de colectores solares planas. En tal sentido, se realiza el diseño y monitorización de un sistema de calefacción con control PID basado en colector solar modular para viviendas del distrito de Puno.

Para el ámbito, la investigación de vivienda en lo general normalmente el revestimiento es inapropiado de las paredes, ventanas, techo, piso, por ello las pérdidas de calor son mayores estableciendo un desequilibrio de temperatura interna. Por lo tanto, se necesita una investigación de forma experimental que este aplicada para determinar en qué medida podemos implementar el sistema de calefacción solar con control PID para lograr un confort térmico que este entre los rangos de 18° y 22°C que propone el Reglamento de Edificación a nivel nacional (RNE). Se supone que estas temperaturas se logran manipulando el flujo de aire



caliente, es decir, para ello se utilizarán dispositivos fototérmicos, como colectores solares modulares planos, que aumentarán la temperatura del flujo de aire para que sea absorbida por el ambiente y distribuida directamente en la vivienda, de forma que la calefacción sea controlada automáticamente por medio de los dispositivos electrónicos.

1.1.2. Formulación del problema

1.1.2.1. Problema general

- ¿Cómo diseñar y monitorizar un sistema de calefacción con control PID basado en colector solar para viviendas del distrito de Puno?

1.1.2.2. Problema específico

- ¿Cómo diseñar el sistema de calefacción con control PID basado en colector solar de placa plana?
- ¿Cómo monitorizar el sistema con control PID?

1.1.3. Justificación del problema

La justificación del proyecto de investigación se desarrolla en tres puntos importantes: técnico, económico y social.

1.1.3.1. Justificación técnica

Para el proyecto de investigación se tiene por la necesidad de mejorar la calidad de vida de las personas o individuos. Este prototipo será un elemento adicional para la mejora e implementación del confort térmico y de esta manera obtener mejores resultados en la climatización de las viviendas.



1.1.3.2. Justificación económica

Diseño y monitoreo de un sistema de calefacción solar controlado por PID para viviendas del distrito de Puno. Esto nos permite mejorar la habitabilidad en viviendas de las personas, mejorando el ambiente del entorno de un hogar, permitiendo el ahorro de la electricidad convencional y utilizando las energías renovables y limpias de las que disponemos en abundancia.

Si se utilizará la energía solar como fuente alternativa a un entorno de calefacción convencional, los costes en funcionamiento se reducirían significativamente del consumo energético convencional que se conoce. La región se ubicada a una altitud de (3827 msnm) tiene una radiación que garantiza un funcionamiento óptimo de las celdas colectoras.

La calefacción tradicional suele funcionar con electricidad o quemar todo tipo de combustibles fósiles, lo que la convierte en un sistema poco accesible para familias con condiciones económicas medias debido al mayor coste de mantenimiento, a diferencia de los colectores solares de placa plana, la calefacción con control PID basado en un colector solar modular que requiere solo una inversión y mantenimiento mínimo. Teniendo en cuenta la tecnología tiene una vida útil de unos 20 años, con el paso de los años, se empezará a considerarse una alternativa viable y sostenible.

1.1.3.3. Justificación social

La finalidad de diseño e implementación de celdas colectoras beneficiará a las personas de las viviendas directamente, el mismo



permitirá confort y calidad de vida. También ayudará a la no contaminación del medio ambiente, y al ahorro de energías eléctrica, utilizando fuentes alternativas como la energía solar térmica.

1.1.3.4. Justificación climatológica

Dada la localización de la región altiplánica de Puno, se tiene las temperaturas más bajas que se registran dentro de los meses junio, julio y agosto con temperaturas muy bajas de -10°C y estos registros de temperatura son altamente sensibles para la salud humana, por ello están fuera del rango recomendable para habitar. Según normas de carácter técnicas del SENAMHI.

1.1.4. Objetivos

1.1.4.1. Objetivo general

- Diseñar y monitorizar un sistema de calefacción con control PID basado en colector solar para viviendas del distrito de Puno.

1.1.4.2. Objetivos específicos

- Diseñar el sistema de calefacción con control PID basado en colector solar de placa plana.
- Monitorizar el sistema con control PID en el distrito de Puno.

1.1.5. Hipótesis



1.1.5.1. Hipótesis general

- El diseño y monitorización de un sistema de calefacción con control PID permitirá el uso del colector solar para viviendas del distrito de Puno.

1.1.5.2. Hipótesis específicas

- El diseño del sistema de calefacción con control PID permitirá el uso del colector solar de placa plana.
- La monitorización permitirá ver en tiempo real el funcionamiento del sistema con control PID.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES

Se presentan diversas investigaciones que fueron realizadas a nivel nacional e internacional, la cual contiene un informe sobre los problemas de investigación desarrollados.

2.1.1. Antecedentes internacionales

La investigación presenta el comportamiento térmico del colector de placa plana, mediante un modelo matemático, para así poder calentar el aire, los elementos que componen el modelo propuesto que permite la distribución temporal y espacial de la temperatura. Al resolver el modelo obtuvieron numéricamente usando el método de diferencias finito, se aplica en ecuaciones no lineales y así determinar el sistema sobre el comportamiento del colector de placas planas. (Lammardo & Baritto, 2010)

El artículo analiza cómo la relación de aspecto influye en la eficiencia térmica de un colector solar de placa plana con doble cubierta de vidrio, utilizado para calentar aire. Se emplean dos enfoques: uno teórico basado en balances de energía y otro experimental con un prototipo instrumentado. Los datos se recopilaron en Montería, Colombia, bajo diversas condiciones climáticas. Se concluye que, con un área constante, la eficiencia térmica mejora al aumentar la relación de aspecto, y que el modelo teórico concuerda adecuadamente con los resultados experimentales. (Ávila Gómez et al., 2010)



El uso de energía solar ha aumentado como alternativa sostenible frente a fuentes convencionales, gracias a los avances tecnológicos que mejoran su eficiencia. En este trabajo se diseñó un sistema de control y un prototipo físico para mantener la temperatura de salida de un colector solar de placa plana dentro del rango de 60 ± 5 °C. Se utilizó Simulink (Matlab) para modelar el sistema y una tarjeta Arduino Mega para ejecutar las acciones del control en función de las condiciones ambientales. Se realizaron pruebas con y sin la estrategia de control, observando que su implementación redujo el coeficiente de variabilidad de 12% a 3%. Según el análisis estadístico, el sistema es efectivo y viable para su uso. (Cabrera Rojas & Sotter Botero, 2019)

2.1.2. Antecedentes nacionales

En esta tesis, implementó un sistema con colectores solares de panel plano para aprovechar la energía solar térmica, dado que en la zona no hay electricidad para radiadores y el uso de calderas resulta costoso por la extracción de combustibles fósiles. Las conclusiones principales fueron que el sistema funcionó y pudo instalarse y probarse, aunque la tesis no abordó la construcción completa. Sin embargo, la temperatura alcanzada fue de 13°C, inferior a la deseada de 18°C, debido a que el agua que ingresó al sistema no alcanzó la temperatura esperada. Este tipo de calefacción por suelo radiante, combinada con energía solar térmica, es una solución eficiente y limpia que distribuye el calor de manera uniforme y puede operar a temperaturas más bajas, lo que reduce costos energéticos y emisiones de CO₂. Los sistemas eléctricos o húmedos pueden alimentarse con energía solar, ya sea térmica o fotovoltaica, lo que los hace adecuados para zonas sin acceso a electricidad convencional y con limitaciones para el uso de combustibles fósiles. (Olivera Olivia, 2011)



El sistema de calefacción solar térmica investigado se divide en tres subsistemas principales: Calentamiento solar de agua: En este primer subsistema, el agua se calienta utilizando energía solar con una radiación de 5,24 kWh/m². Esto se logra mediante colectores solares que captan la radiación y transfieren el calor al agua que circula por ellos, formando un circuito cerrado para optimizar el uso del fluido caloportador. Calefacción de espacios: El segundo subsistema se encarga de distribuir el calor mediante radiadores de agua caliente. Se instalaron tres juegos de radiadores, cada uno con diez secciones para la distribución del agua caliente, lo que permite calentar los ambientes de manera eficiente. Recirculación de transferencia de calor: El tercer subsistema gestiona la recirculación del agua caliente en un circuito cerrado, evitando el consumo adicional de agua y manteniendo la eficiencia del sistema. La caída de presión en las tuberías es mínima, lo que permite que el sistema funcione sin intervención humana directa. El sistema está programado para operar automáticamente con un temporizador que enciende el sistema a las 08:00 y lo apaga a las 14:00, garantizando un funcionamiento controlado y eficiente sin necesidad de supervisión constante. En conjunto, estos subsistemas conforman un sistema de calefacción solar térmica. (Mercado & Machaca, 2017)

El artículo analiza el uso de colectores solares de placa plana de polipropileno UV para la calefacción de piscinas, especialmente viable en zonas con alta radiación solar, como el sur del Perú. Ante el agua fría de red (5-15 °C) y las bajas temperaturas nocturnas, se busca mantener la piscina en un rango confortable de 28-32 °C durante todo el año, sin recurrir a fuentes adicionales de energía como electricidad o GLP. La inversión en este sistema presenta un rápido retorno (menos de un año) y altos beneficios técnicos, económicos y de confort.



Además, se evalúa el uso de cerramientos sobre la piscina para crear un efecto invernadero, mejorando las condiciones térmicas para los usuarios incluso fuera del agua. La información experimental obtenida permite analizar el comportamiento térmico de estos sistemas cerrados, distinto al de las piscinas al aire libre. (Rivasplata Cabanillas et al., 2020)

2.2. MARCO TEÓRICO Y MARCO CONCEPTUAL

2.2.1. Energía solar térmica

La energía solar térmica se basa en aprovechar el calor del sol mediante dispositivos como paneles, colectores o sensores específicamente diseñados para ello. El funcionamiento de este tipo de sistema comienza cuando el panel solar capta la radiación solar y la convierte en calor. Posteriormente, un fluido que suele ser agua o aire circula por el interior del panel, absorbiendo ese calor. Una vez calentado, el fluido puede almacenarse o dirigirse directamente al área donde se requiere su uso. (Bulnes & Best, 2010)

Horace Bénédicte de Saussure, un científico suizo del siglo XVIII, diseñó un dispositivo experimental conocido como la "caja caliente" para estudiar el calentamiento solar. Este modelo consistía en una caja con el interior pintado de negro, aislada en los laterales y cubierta en la parte superior con una tapa de vidrio transparente. Al exponerla al sol, la caja podía alcanzar temperaturas internas superiores a 110 °C, llegando incluso a medir hasta 120 °C en algunos casos. El vidrio cumple un papel crucial en este fenómeno, actuando de manera similar al efecto invernadero. Por un lado, permite que la radiación solar visible entre y caliente el interior de la caja, pero, por otro lado, impide que el aire caliente escape y reduce la salida de radiación infrarroja emitida por las superficies calientes



dentro de la caja, ya que el vidrio no es transparente a esta radiación térmica. Esto provoca que el calor quede atrapado en el interior, elevando la temperatura considerablemente. Saussure también llevó su caja caliente a diferentes altitudes para comprobar cómo la atmósfera afectaba la retención del calor, observando que incluso en condiciones frías externas, el interior de la caja mantenía temperaturas elevadas. Este invento fue el precursor de los colectores solares térmicos modernos y demostró la viabilidad práctica de aprovechar la energía solar para generar calor. (Bulnes & Best, 2010)

2.2.2. Aplicación de la energía solar térmica

2.2.2.1. Producción de agua caliente

La energía solar térmica es una solución rentable para la producción de agua caliente sanitaria (ACS), especialmente adecuada porque los paneles solares térmicos estándar alcanzan temperaturas óptimas entre 40 y 45 °C, que son ideales para uso doméstico. Esta tecnología es eficiente para generar agua caliente durante todo el año, lo que permite amortizar la inversión rápidamente en comparación con aplicaciones estacionales como la calefacción, que solo se utiliza en meses fríos. Los sistemas solares térmicos para ACS funcionan mediante colectores solares que captan la radiación solar para calentar un fluido caloportador, que a su vez transfiere el calor al agua sanitaria a través de un intercambiador, manteniendo ambos circuitos separados para garantizar la calidad del agua de consumo. Gracias a esta tecnología, se puede ahorrar más del 70% de la energía convencional destinada a calentar agua, reduciendo costos y el impacto ambiental. Además, el uso de energía solar



térmica para ACS contribuye a la independencia energética y al ahorro económico, ya que disminuye la dependencia de combustibles fósiles y electricidad, y existen subvenciones que facilitan la instalación de estos sistemas. Por todo ello, la energía solar térmica es una alternativa sostenible, eficiente y rentable para la producción continua de agua caliente sanitaria en hogares. (Ruzafa Otón, 2009)

2.2.2.2. Sistema de calefacción

La energía solar térmica presenta un potencial interesante para cubrir al menos parcialmente las necesidades de calefacción de los edificios, especialmente considerando el alto coste de mantener temperaturas confortables en invierno. Sin embargo, uno de los principales retos es la temperatura de funcionamiento requerida: los sistemas de calefacción convencionales suelen suministrar agua a los radiadores a temperaturas entre 70 y 80 °C, mientras que los colectores solares planos sin tratamiento selectivo generalmente no superan los 60 °C, limitando su uso principalmente a precalentar el agua. Por ello, la energía solar térmica se utiliza habitualmente como apoyo a la calefacción convencional, ayudando a reducir el consumo de combustibles fósiles y electricidad, y contribuyendo a la eficiencia energética y la reducción de emisiones contaminantes. Los sistemas solares térmicos pueden combinarse con radiadores tradicionales o sistemas de suelo radiante, aunque el rendimiento puede variar según la temperatura de retorno y el diseño del sistema. Además, para maximizar su eficacia, es necesario un correcto dimensionamiento del sistema y un adecuado almacenamiento térmico que permita suplir la irregularidad de la radiación solar, especialmente en



meses fríos o con baja insolación. En resumen, aunque la energía solar térmica no suele cubrir el 100% de la demanda de calefacción en climas fríos, representa una alternativa sostenible y rentable para reducir costes y emisiones cuando se integra con sistemas convencionales de calefacción. (Ruzafa & Lopez, 2009)

2.2.3. Clasificación de los sistemas de energía solar térmica

2.2.3.1. Sistema de temperatura baja

La energía solar de baja temperatura se emplea principalmente en aplicaciones domésticas y, por lo general, se instala en los techos de casas o edificaciones comerciales. Estos sistemas funcionan calentando un fluido, generalmente agua o aire, hasta temperaturas que no superan los 100 °C. Para captar la energía solar, se emplean principalmente colectores solares planos o colectores de tubo de vacío, que actúan como receptores fijos de la radiación solar. El proceso es sencillo pero muy útil: los colectores absorben la radiación solar y transfieren ese calor al fluido que circula por ellos. Este fluido caliente puede luego ser utilizado para diversas aplicaciones, principalmente la producción de agua caliente sanitaria (ACS) y calefacción doméstica. Los colectores planos, que son los más comunes en residencias, suelen operar eficientemente hasta unos 80 °C, lo que es adecuado para estas aplicaciones. Además de ACS y calefacción, la energía solar térmica de baja temperatura también se emplea para climatizar piscinas y en algunos procesos industriales que requieren calor moderado. En general, estos sistemas son una alternativa sostenible y rentable para reducir el consumo de energía convencional,



aprovechando la abundante radiación solar disponible en muchas regiones.

(Ruzafa & Lopez, 2009)

2.2.3.2. Sistema de temperatura alta

La tecnología solar térmica de temperatura media está diseñada para aplicaciones que requieren temperaturas superiores a 80 °C, rango en el cual los colectores planos convencionales muestran un rendimiento reducido. Para generar vapor en un rango entre 100 °C y 250 °C, es necesario emplear sistemas de concentración solar que utilizan lentes o espejos parabólicos para focalizar la radiación solar en un receptor pequeño, aumentando significativamente la temperatura del fluido. Actualmente, los colectores parabólicos son los más desarrollados para estas aplicaciones. Estos dispositivos utilizan espejos que concentran la luz solar para calentar un líquido hasta producir vapor, el cual puede accionar una turbina y convertir la energía térmica en energía mecánica, posibilitando así la generación de electricidad o su uso en procesos industriales. Esta tecnología es especialmente útil en sectores industriales que requieren calor a temperaturas moderadas y en plantas de generación eléctrica termo solar. La energía solar térmica de media temperatura se sitúa entre los 100 °C y 300 °C, utilizando colectores solares de concentración, como los parabólicos, para alcanzar estas temperaturas elevadas que no son posibles con colectores planos convencionales. Esta tecnología contribuye a la sostenibilidad energética al reducir el uso de combustibles fósiles y permite aplicaciones industriales y generación eléctrica a pequeña y mediana escala. (Roldán Serrano, 2013)



2.2.4. Energía solar fotovoltaica

El efecto fotovoltaico se produce cuando la luz del sol impacta en un material semiconductor, como el silicio, y la energía de los fotones presentes en esa luz logra desprender electrones de los átomos del material. Esta liberación de electrones aumenta la movilidad de estos dentro del material, transformándolo en un conductor eléctrico temporalmente. Para que este proceso se inicie, la energía del fotón debe ser superior a un umbral mínimo, aproximadamente 1,2 electronvoltios (eV). En detalle, cuando un fotón con energía suficiente impacta un electrón en el semiconductor, le transfiere energía que permite al electrón superar la fuerza que lo mantiene unido al núcleo atómico (energía de valencia) y liberarse. Estos electrones libres pueden entonces desplazarse a través del material, generando una corriente eléctrica continua. En las células solares, esta corriente es dirigida mediante un campo eléctrico interno creado por una unión pn, facilitando la extracción de electricidad útil. Por tanto, el efecto fotovoltaico es la conversión directa de la radiación solar en electricidad gracias a la interacción de los fotones con los electrones de un semiconductor, proceso que comienza cuando la luz incide sobre el material y aporta la energía necesaria para liberar y movilizar electrones. (Lopez, 2006)

2.2.5. Radiación solar

Quien quiera aprovechar la energía solar debe primero conocer cuánta radiación solar llegará al lugar donde pretende captarla, es decir, la cantidad de energía que recibe por unidad de área. La radiación solar es la energía que el Sol genera y transmite en forma de ondas electromagnéticas hacia todas las direcciones del espacio, como consecuencia de las reacciones de fusión nuclear

que ocurren en su núcleo. Esta energía llega a la Tierra con una potencia aproximada de $1,367 \text{ W/m}^2$ en el espacio exterior, valor conocido como la constante solar.

Sin embargo, la cantidad de radiación que realmente alcanza la superficie terrestre varía según la región del planeta, la hora del día, la estación del año y las condiciones atmosféricas, debido a la absorción y dispersión por gases, nubes y partículas en la atmósfera. La radiación que llega a la superficie se compone de radiación directa, difusa y reflejada, y es fundamental para determinar el potencial energético solar de un lugar. La radiación solar es la base para calcular la energía aprovechable en un sitio específico y depende de factores geográficos y climáticos, siendo esencial medirla para diseñar sistemas solares eficientes y adecuados a cada región. (López, 2006)

2.2.6. Tipos de colectores solares

Basado en los rangos de temperatura y el uso industrial, este trabajo cubre colectores de temperatura baja y media.

2.2.6.1. Colectores de baja temperatura

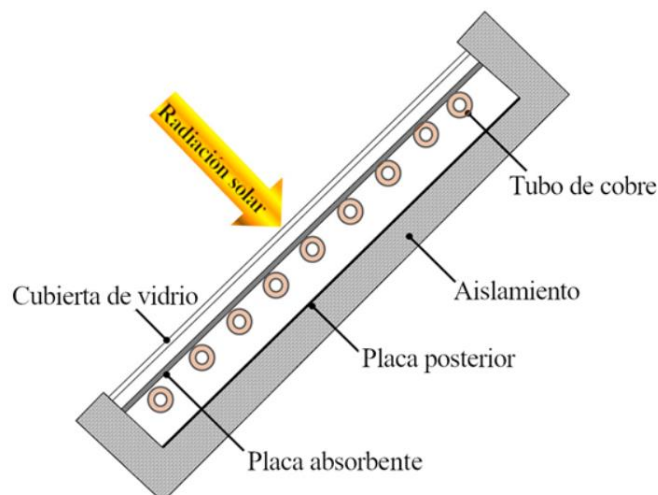
- **Colector de placa plana**

El colector solar de placa plana (FPC) convierte la energía solar en energía térmica mediante un panel compuesto por una cubierta de vidrio que permite el paso de la radiación solar hasta que ésta incide sobre una placa absorbente con superficie selectiva. Esta placa absorbe la energía y la transfiere al fluido caloportador que circula por unos tubos integrados en el panel, calentándolo para luego almacenarla o usarla directamente como se observa en la figura 1. Para minimizar las pérdidas de calor, el

colector cuenta con aislamiento térmico en la parte inferior y los laterales de la carcasa, mientras que la cubierta de vidrio reduce la pérdida de calor por convección y radiación emitida por la placa absorbente, aprovechando el efecto invernadero para mantener la temperatura interna elevada. Los colectores planos pueden captar tanto radiación solar directa como difusa, lo que los hace efectivos incluso en días nublados, aunque al ser fijos absorben menos energía por unidad de superficie. Estos dispositivos operan eficientemente a temperaturas inferiores a 100 °C y, debido a su diseño sencillo, tienen un costo relativamente bajo en el mercado, siendo una opción popular para aplicaciones domésticas y comerciales de energía solar térmica, especialmente para la producción de agua caliente sanitaria y calefacción. (Carrión-Chamba et al., 2022)

Figura 1

Partes de un colector de placa plana



Nota: tomado de (Carrión-Chamba et al., 2022)

- **Colector de tubos de vacío**

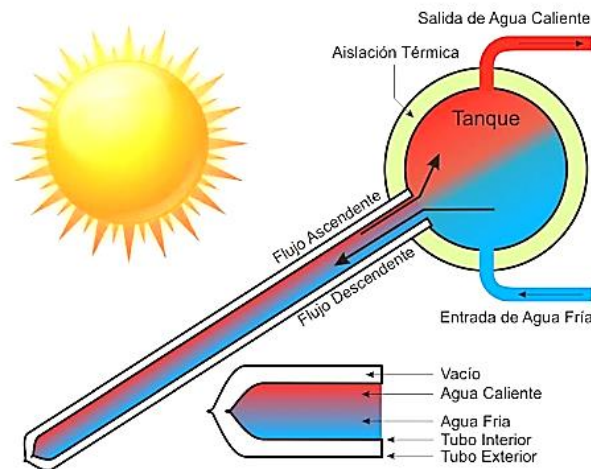
El colector de tubos de vacío (ETC) está formado por una serie de tubos de vidrio concéntricos, donde el tubo interior lleva una capa



absorbente selectiva y el espacio entre ambos tubos está vacío para minimizar las pérdidas de calor por conducción y convección. Gracias a este aislamiento al vacío, el colector puede operar a temperaturas más altas que los colectores planos, alcanzando hasta 120 °C, lo que mejora su eficiencia térmica y competitividad en el mercado. El funcionamiento del colector ETC se basa en el principio de evaporación-condensación, también conocido como ciclo Heatpipe. En este proceso, la radiación solar calienta un fluido volátil dentro del tubo interior (como metanol o etanol), que se evapora y asciende en forma de vapor hacia la parte superior del tubo, donde se encuentra un condensador. Allí, el vapor libera su calor latente al fluido del circuito principal, condensándose y regresando en forma líquida al fondo del tubo para reiniciar el ciclo. Este sistema permite una transferencia eficiente del calor captado al circuito de calefacción o almacenamiento. Además, los tubos de vacío captan la radiación solar tanto directa como lateral, y el vacío entre los tubos reduce las pérdidas térmicas a valores muy bajos, aumentando la eficiencia del sistema incluso en condiciones frías o nubladas. La tecnología Heatpipe incluye mecanismos como ThermProtect, que evita el sobrecalentamiento al interrumpir la transferencia de calor cuando la temperatura es demasiado alta, protegiendo así el sistema. Los colectores de tubos de vacío como se muestra en la figura 2, combinan un aislamiento térmico superior con un eficiente ciclo de evaporación-condensación para ofrecer un rendimiento térmico elevado, operando a temperaturas hasta 120 °C y siendo una opción rentable y competitiva para aplicaciones solares térmicas domésticas e industriales. (Pineda Medina, 2014)

Figura 2

Vista transversal de un colector de tubos del tipo heat-pipe



Nota: tomado de (Pineda Medina, 2014)

- **Colector parabólico compuesto**

El colector parabólico compuesto (CPC) que se observa en la figura 3, está formado por dos superficies parabólicas reflectantes que comparten el mismo foco, donde se sitúa un tubo absorbedor en el centro para captar la radiación solar que entra dentro de su ángulo de aceptación. Este diseño permite concentrar tanto la radiación solar directa como la difusa, mejorando el aprovechamiento de la energía solar dispersa y reduciendo la necesidad de ajustes constantes para el seguimiento del sol debido a su amplio ángulo de aceptación.

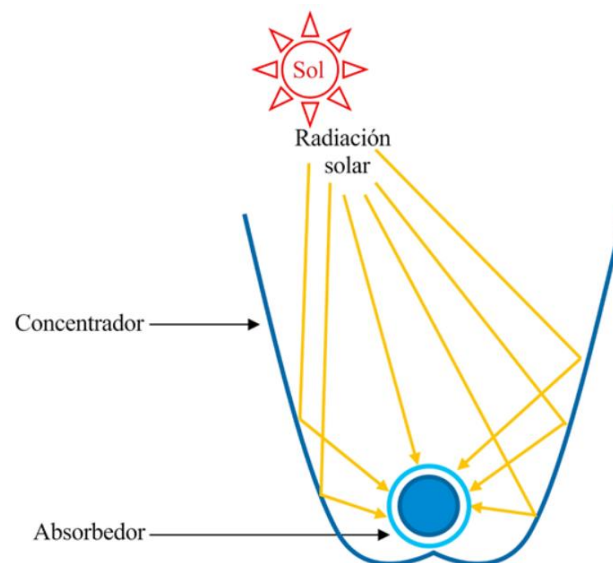
Una ventaja importante del CPC es que, al ser estacionario, no requiere mecanismos complejos de seguimiento solar, lo que simplifica su operación y reduce costos de mantenimiento. Para aumentar su eficiencia, es común acoplar CPC con tubos de vacío como absorbedores, combinando el efecto de concentración con un aislamiento térmico superior que permite alcanzar temperaturas de operación cercanas a los

150 °C, adecuadas para aplicaciones industriales y procesos térmicos de media temperatura.

En resumen, el CPC es un concentrador solar eficiente que utiliza dos reflectores parabólicos para enfocar la radiación en un tubo receptor central, optimizando la captación de radiación solar incluso en condiciones de luz difusa y con menor necesidad de seguimiento solar, lo que lo hace competitivo para aplicaciones térmicas que requieren temperaturas moderadas. (Echevarria, 2011)

Figura 3

Colector parabólico compuesto



Nota: tomado de (Echevarria, 2011)

2.2.6.2. Colectores de temperatura media

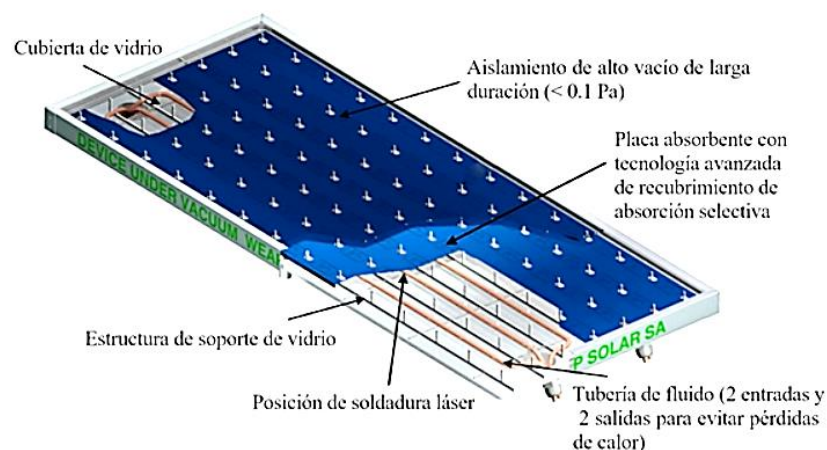
- **Colector de placa plana evacuada**

El colector de placa plana evacuado (EFPC) integra el diseño clásico del colector de placa plana (FPC) con el uso del vacío característico de los colectores de tubos de vacío (ETC). Su construcción consta de una

carcasa de aluminio que alberga elementos esenciales como una lámina de vidrio en la parte superior, una placa absorbente con alta eficiencia de captación solar, una bobina de cobre encargada del intercambio de calor y una base inferior. El vacío en el interior evita las pérdidas de calor por conducción y convección, lo que mejora notablemente la eficiencia térmica del colector. Además, esta característica permite que el EFPC ocupe menos superficie que un colector ETC para alcanzar un rendimiento similar. Gracias a esta tecnología, el colector de la figura 4, puede operar en un rango de temperaturas medias entre 120 y 180 °C, lo que lo hace adecuado para satisfacer demandas de calefacción industrial que requieren temperaturas más elevadas que las alcanzables con colectores planos convencionales o tubos de vacío estándar. El EFPC ofrece una solución eficiente y compacta para aplicaciones industriales de media temperatura, uniendo la simplicidad y bajo costo de los colectores planos con el aislamiento térmico avanzado del vacío para lograr un mejor desempeño térmico y menor espacio requerido. (Carrión-Chamba et al., 2022)

Figura 4

Estructura del colector de placa plana evacuado



Nota: tomado de (Carrión-Chamba et al., 2022)

- **Colector cilíndrico parabólico**

El colector cilindro parabólico (PTC) utiliza una lámina con forma parabólica que refleja y concentra la radiación solar directa hacia un tubo receptor situado a lo largo de la línea focal. Este tubo metálico, generalmente de cobre recubierto con un material selectivo, mejora la absorción y transferencia de calor al fluido caloportador que circula en su interior como se muestra en la figura 5. Para minimizar las pérdidas térmicas por convección, el tubo absorbente está aislado al vacío mediante un tubo de vidrio, aunque esto no elimina las pérdidas ópticas por reflexión.

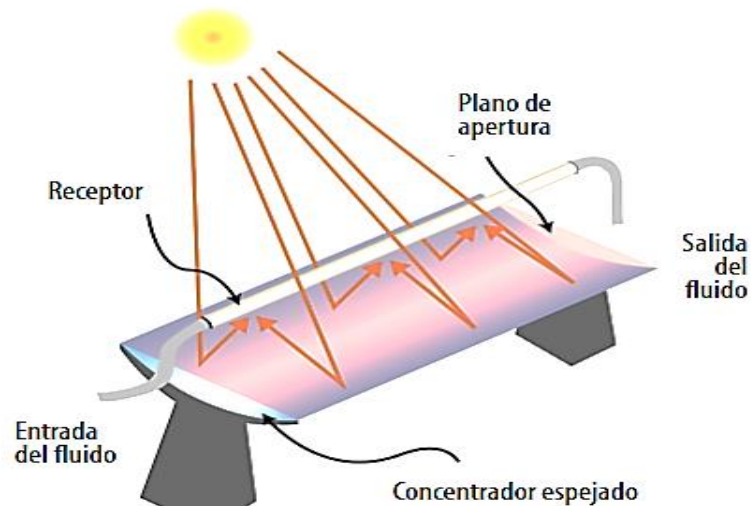
Estos colectores requieren un sistema de seguimiento solar para orientarse durante el día y maximizar la captación de energía. La orientación puede configurarse en dirección norte-sur con seguimiento este-oeste para optimizar la captación en verano, o en dirección este-oeste con seguimiento norte-sur para maximizar la energía en invierno. En aplicaciones industriales, los colectores cilindro parabólicos suelen tener una superficie de captación menor a 250 m² y operan a temperaturas medias inferiores a 300 °C.

Su diseño permite concentrar la radiación solar en dos dimensiones, alcanzando concentraciones usuales entre 30 y 80 veces la radiación incidente, y calentando el fluido en el tubo receptor para usos térmicos o generación eléctrica. El PTC es un concentrador solar eficiente que, mediante su forma parabólica y seguimiento solar, focaliza la radiación directa en un tubo receptor aislado al vacío para minimizar pérdidas térmicas, alcanzando temperaturas medias de hasta 300 °C, lo que

lo hace adecuado para procesos industriales y generación de energía térmica o eléctrica. (Panaroni et al., 2021)

Figura 5

Esquema de un colector cilindro parabólico



Nota: tomado de (Panaroni et al., 2021)

- **Colector lineal Fresnel**

El colector lineal Fresnel (LFC) consta de dos elementos fundamentales: un tubo absorbente estacionario, a través del cual fluye el fluido encargado de transferir el calor, y una serie de espejos reflectantes dispuestos horizontalmente, los cuales giran sobre un único eje para rastrear el desplazamiento solar a lo largo del día. La radiación solar incide sobre estos espejos, que pueden ser curvos o planos, y la reflejan concentrándola sobre el tubo absorbente, aumentando así la densidad de energía recibida que se observa en la figura 6. Para mejorar la concentración, algunos diseños incorporan un concentrador parabólico compuesto (CPC) sobre el receptor, que redirige la radiación hacia el tubo absorbente, incrementando la eficiencia del sistema.

Una ventaja importante del LFC frente al colector parabólico cilíndrico (PTC) es su fabricación más sencilla, lo que reduce el coste de inversión. Sin embargo, el LFC presenta limitaciones ópticas y geométricas, como el sombreado y bloqueo entre espejos, que disminuyen su eficiencia de captación. En aplicaciones industriales, los colectores Fresnel lineales operan en un rango de temperaturas medias que va aproximadamente de 60 °C a 250 °C, siendo adecuados para procesos que requieren calor a estas temperaturas. Su diseño permite concentrar la radiación solar en una línea focal, donde el fluido caloportador absorbe el calor para ser utilizado en sistemas térmicos industriales. El colector Fresnel lineal es una tecnología de concentración solar que utiliza espejos planos o curvos con seguimiento uniaxial para reflejar la radiación solar hacia un tubo receptor fijo, con ventajas en coste y simplicidad, aunque con ciertas pérdidas ópticas por sombras, y capaz de alcanzar temperaturas medias útiles para procesos industriales. (Bernhard et al., 2008)

Figura 6

Esquema de un colector lineal Fresnel



Nota: tomado de (Bernhard et al., 2008)



2.2.7. Fundamentos de calefacción

2.2.7.1. Calefacción

La calefacción es un sistema o procedimiento que permite aportar calor a un espacio, objeto o persona con el propósito de conservar o incrementar su temperatura. En un sentido amplio, se relaciona con las medidas destinadas a modificar las condiciones climáticas internas de un lugar o influir en factores externos que afectan a los individuos, buscando lograr un adecuado confort térmico. Asimismo, el término calefacción engloba todos los recursos y tecnologías empleadas para generar ese calor. En instalaciones convencionales, los radiadores suelen instalarse debajo de las ventanas, ya que esta ubicación ayuda a reducir la pérdida de calor a través del vidrio. Esta disposición permite una mejor circulación del aire caliente por convección, lo que favorece una distribución uniforme del calor en el ambiente y mejora la sensación térmica del lugar. (Mercado & Machaca, 2017)

2.2.7.2. Confort térmico

El confort térmico es un aspecto fundamental en el diseño de edificios, especialmente en espacios como aulas, donde influye directamente en el bienestar, la salud y el rendimiento de las personas. Se define como una sensación neutra de satisfacción con el ambiente térmico, generalmente alcanzada cuando la temperatura interior se encuentra entre 21 °C y 27 °C, aunque este rango puede variar según la adaptación climática de los ocupantes. Por ejemplo, personas acostumbradas a climas cálidos como la selva amazónica toleran temperaturas más altas (alrededor



de 28 °C), mientras que quienes viven en zonas frías de los Andes prefieren temperaturas más bajas (cerca de 19 °C). Para lograr un óptimo confort térmico en edificios, es clave diseñar adecuadamente la envolvente térmica, que actúa como filtro entre el clima exterior y el interior, estabilizando la temperatura y reduciendo la necesidad de sistemas mecánicos. Esto implica trabajar con un buen aislamiento térmico, control de la ganancia solar, inercia térmica y ventilación adecuada. Además, se deben considerar parámetros como la humedad relativa, la temperatura radiante, la velocidad del aire y evitar variaciones bruscas que puedan afectar la percepción térmica. En el contexto educativo, mantener temperaturas dentro de la zona de confort es crucial para evitar distracciones y favorecer el aprendizaje, ya que temperaturas demasiado bajas o altas, junto con otros factores como iluminación y ruido, pueden comprometer el rendimiento de los estudiantes. Por ello, las normativas y guías de diseño bioclimático en países como Perú promueven estrategias pasivas y activas para alcanzar condiciones higrotérmicas adecuadas en las aulas. El confort térmico es una condición subjetiva pero medible que depende de múltiples factores ambientales y personales. Su integración desde las primeras etapas del diseño arquitectónico, mediante el uso de materiales adecuados, orientación, ventilación y sistemas de aislamiento, permite crear ambientes interiores saludables, confortables y energéticamente eficientes, adaptados a las condiciones climáticas y culturales de cada región. (Guzman Bravo & Ochoa de la Torre, 2014)

2.2.7.3. Parámetros del confort térmico

El resultado de la interacción entre parámetros ambientales (temperatura, humedad, velocidad del aire, temperatura radiante), condiciones arquitectónicas y factores personales (actividad, ropa, metabolismo), y debe cumplir con normativas específicas para garantizar ambientes saludables y confortables en edificaciones. En cuanto a la reglamentación nacional de la construcción, la Tabla N° 17 del Anexo N° 6 establece límites y condiciones para los parámetros térmicos en edificios o locales que se van a ensayar, definiendo zonas ocupadas donde deben mantenerse condiciones térmicas adecuadas para el confort. Por ejemplo, se consideran rangos de temperatura interior recomendados según la estación y humedad relativa, con valores típicos como 21 °C en invierno y 26 °C en verano, ajustables según el tipo de usuario y actividad, tal y como se muestra en la Tabla 1. (Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, 2006)

Tabla 1

Rango de las temperaturas de locales y establecimientos

EDIFICACIÓN O LOCAL	TEMPERATURA °C
Vivienda	18
Locales de trabajo	18 – 20
Salas de exposiciones	15 - 18
Bibliotecas, archivos	15 – 18
Oficinas	20
Restaurantes	20
Cantinas	18
Grandes almacenes	20
Cines y teatros	20
Hospitales	
• Salas de reconocimiento y de tratamiento	24 20 - 22
• Salas de hospitalización	



EDIFICACIÓN O LOCAL	TEMPERATURA °C
Cocinas	20
Tiendas	20
Escuelas	
• Aula	20
• Gimnasios	15 – 18
• Pechinas de aprendizaje cubiertas	24
Salas de actos	20
Salas de juntas	18

Nota: Tabla No 17 anexo No 4 del reglamento nacional de edificaciones de viviendas.
(Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, 2006)

2.2.8. Carga térmica

También denominada requerimiento térmico, se refiere a la cantidad de energía que se necesita para conservar en un espacio determinado ciertas condiciones de temperatura y humedad, tanto para calefacción como para refrigeración. Esta necesidad energética está influenciada por diversos factores, como las propiedades térmicas del entorno, la orientación del inmueble, el uso que se le da al espacio y el clima de la zona.

Durante el verano, la carga térmica suele estar dominada por las ganancias de calor que entran al interior, principalmente por radiación solar a través de ventanas y cerramientos, así como por la infiltración de aire caliente y la generación interna de calor (personas, equipos, iluminación). Esto genera la necesidad de sistemas de refrigeración para mantener temperaturas confortables.

En invierno, la carga térmica se centra en las pérdidas de calor hacia el exterior, a través de paredes, techos, ventanas y ventilación, debido a la diferencia entre la temperatura interior deseada y la temperatura exterior más baja. Por ello, se requiere aportar energía para compensar estas pérdidas y mantener el ambiente cálido. (La & Acad, 2012)



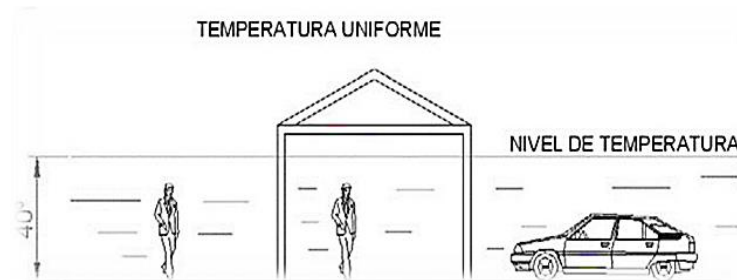
2.2.8.1. Ambiente no climatizado

Cuando una habitación no cuenta con aire acondicionado, su temperatura tiende a equilibrarse con la temperatura exterior como se observa en la figura 7, por lo que, si hace frío, el ambiente interior se enfriará, y si hace calor, se calentará, alcanzando un estado de equilibrio térmico con el exterior. Para mantener una temperatura diferente al ambiente, es necesario introducir o extraer calor del espacio, lo que genera una diferencia térmica entre el interior y el exterior.

Esta diferencia provoca la transferencia de calor a través de paredes, suelos, ventanas y ventilación, que tiende a igualar las temperaturas interior y exterior. Sin aire acondicionado, para manejar la temperatura interior se pueden aplicar estrategias pasivas que minimizan la ganancia o pérdida de calor. Por ejemplo, cerrar cortinas o persianas durante el día bloquea la radiación solar directa y evita que la habitación se sobrecaliente, mientras que ventilar por la noche permite renovar el aire y refrescar el ambiente cuando la temperatura exterior es más baja. Además, crear corrientes de aire con ventiladores o sistemas naturales, como la ventilación cruzada, ayuda a mejorar la sensación térmica sin modificar la temperatura real del aire. Sin aire acondicionado, la temperatura interior se adapta a la exterior mediante intercambio térmico, y para mantener confort térmico es necesario controlar la transferencia de calor mediante aislamiento, control solar, ventilación estratégica y otras técnicas pasivas que modulen la temperatura y mejoran la calidad del aire interior. (Mercado & Machaca, 2017)

Figura 7

Local que se adapta a la temperatura del ambiente



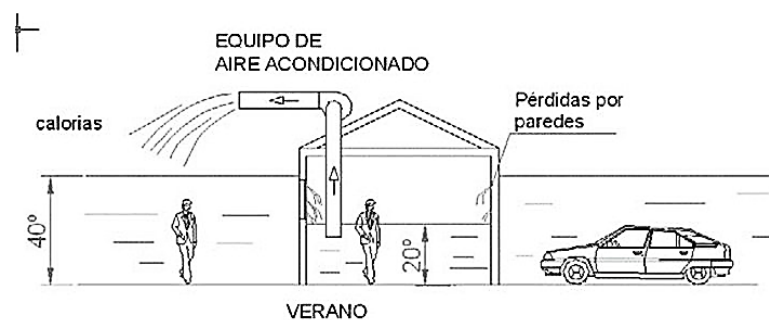
Nota: tomado de (Mercado & Machaca, 2017)

2.2.8.2. Ambiente climatizado en verano

Para lograr un ambiente climatizado en verano, el sistema de aire acondicionado funciona extrayendo calor del interior y expulsándolo al exterior mediante un ciclo de refrigeración. Este proceso implica que el calor se transfiera desde el interior del local hacia el exterior, no hacia el interior como se menciona en la premisa. En la Figura 8 se muestra una transferencia de calor hacia el interior, podría referirse a un escenario específico (ej.: mal funcionamiento del equipo o error en la interpretación gráfica), ya que el principio básico de climatización en verano es extraer calor del espacio climatizado. (Varela Montoya et al., 2023)

Figura 8

Extracción de calor o aire caliente en verano



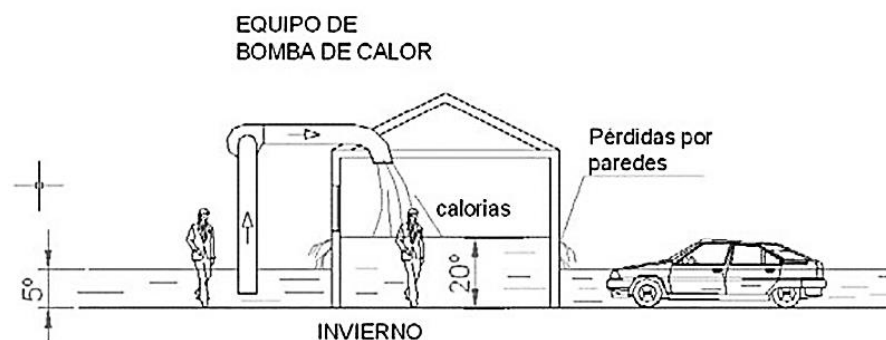
Nota: tomado de (Mercado & Machaca, 2017)

2.2.8.3. Ambiente climatizado en invierno

En invierno, el calor debe ser absorbido y la pérdida de calor se produce externamente. Ver Figura 9. Finalmente se consigue un equilibrio entre la potencia de los equipos de aire acondicionado y las transmisiones a través de las paredes, techo, tienden a restablecer la temperatura inicial. En cualquiera de los dos casos, el intercambio de calor con el ambiente ya sea ganancia o pérdida se conoce como "pérdida térmica" y debe ser evaluado para definir la capacidad del sistema de aire acondicionado requerido. El calor total representa la cantidad necesaria para cubrir la demanda térmica del espacio, ya sea agregando o extrayendo calor. Como se ha mencionado, es indispensable contar con al menos tres datos para realizar este cálculo. La temperatura interior varía según las características del espacio. Por otro lado, la temperatura exterior está determinada por la ubicación geográfica, ya sea en una zona cálida o fría. Además, influye el nivel de aislamiento térmico de las paredes y techos del lugar, dependiendo de si están bien o mal acondicionados. (Varela Montoya et al., 2023)

Figura 9

Adición de calor en temporada de invierno



Nota: tomado de (Mercado & Machaca, 2017)

2.2.9. Fundamentos de sistemas de control automático

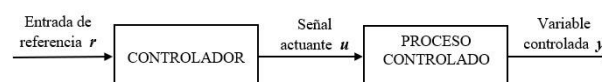
El control automático ha revolucionado la ingeniería y la ciencia al optimizar procesos industriales y sistemas avanzados mediante la regulación precisa de variables críticas como temperatura, humedad, presión y flujo. Su aplicación en sectores como climatización, robótica y manufactura lo convierte en un campo indispensable para ingenieros y científicos que buscan integrar teoría y práctica. (Ogata, 2010)

2.2.9.1. Control en lazo abierto

Se trata de modelos no complejos nombrados sistemas de control abiertos. Estos sistemas no son difíciles de satisfacer requisitos críticos de rendimiento. Por ejemplo, tenemos una lavadora que es un sistema en control de lazo abierto por ello el tiempo que hace el lavado está establecido por el ser humano. Los elementos del sistema se dividen en dos partes, el proceso controlado y el control, se muestra en la figura 10. Se aplica una señal en la entrada r hacia el controlador, la salida ejecuta la señal de activación u , y la señal de activación ordena al proceso controlado para que el valor controlado y opere con los valores predeterminados. (Kuo, 1996)

Figura 10

Elementos de un sistema de control en lazo abierto



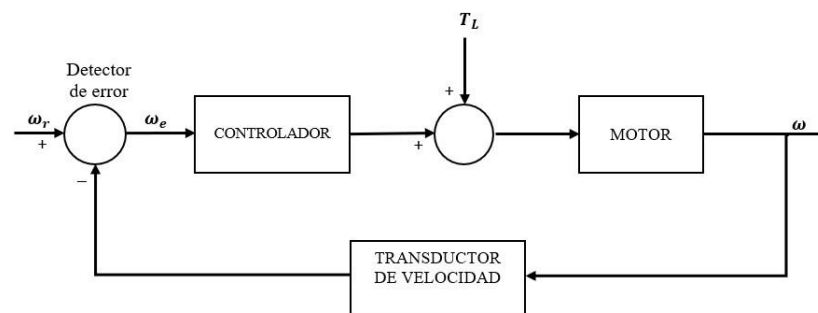
Nota: tomado de (Kuo, 1996)

2.2.9.2. Control en lazo cerrado

Para lograr un control más preciso, es necesario que la señal de salida se retroalimente y se compare con la señal de entrada de referencia. A partir de esta comparación, se genera una señal de control proporcional a la diferencia entre ambas señales, la cual es enviada al sistema para corregir el error. Un sistema que utiliza una o más rutas de retroalimentación, como el descrito, se conoce como sistema cerrado. En la figura 11 se observa la velocidad del eje, para la entrada de referencia ω_r ajusta la velocidad a la velocidad anhelada. La velocidad de ralentí del motor debe estar dentro del rango referente ω_r' y algún cambio como el causado por la carga T_L , esta detectado por sensor de velocidad. (Kuo, 1996)

Figura 11

Control de velocidad en ralentí en lazo cerrado



Nota: (Kuo, 1996)

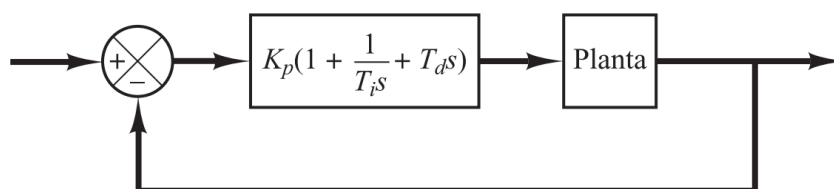
2.2.10. Sistemas de control PID

El rendimiento de los controladores PID reside en la aplicación casi universal en general los sistemas de control. En lo distintivo, cuando no se conoce el modelo matemático de la planta a controlar y por ello no se pueden utilizar

procedimientos de diseño analítico, los controladores PID son beneficiosos en las plantas industriales para los sistemas de control de procesos, se sabe que los diseños de control PID básicos y avanzados vienen demostrando ser útiles para proporcionar un control satisfactorios, en muchas situaciones específicas no son óptimas. Se observa en figura 12, se tiene el control PID mediante bloques de una planta. El modelo matemático de la planta se puede obtener aplicando varias técnicas de diseño, para establecer los criterios del controlador, cumplan con las determinaciones transitorias y de estado estable del sistema de circuito cerrado. Si no es posible obtener mediante método analítico el modelo matemático de la planta, se pasa a realizar procedimientos experimentales para obtener un modelo matemático y así poder ajustar los controladores PID. (Ogata, 2010)

Figura 12

Bloque de control PID de una planta



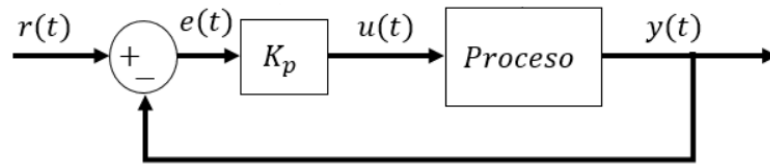
Nota: tomado de (Ogata, 2010)

2.2.10.1. Acción de control proporcional (P)

Para el controlador proporcional radica en obtener un factor de ganancia puro, citado constante proporcional K_p , que se adapta para gestionar el valor enviado al proceso a través del actuador. La proporcionalidad del controlador PID se viene utilizando generalmente para adaptar la velocidad de respuesta de un sistema o planta controlado como se puede apreciar el diagrama de bloques de la figura 13, que representa un control proporcional.

Figura 13

Bloque de control proporcional



Nota: Se observa el bloque de control proporcional realimentado.

Variable de proceso de acción proporcional.

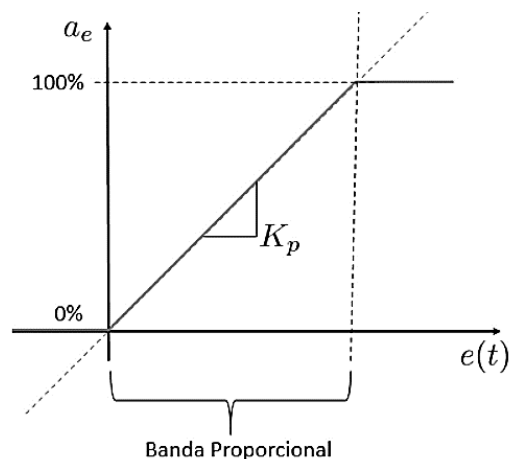
$$u(t) = K_p e(t) \quad (1)$$

$$u(t) = K_p (r(t) - y(t)) \quad (2)$$

La pendiente de la rampa viene dada por el valor K_p , cuanto mayor sea este valor, más pronunciada será la rampa. Nótese que el grado de libertad del controlador se puede observar en la rampa y se conoce como banda proporcional, cuanto mayor sea el valor de K_p menos proporcional será la banda lo que puede ser perjudicial para el elemento de control final, ya que puede ser visto a la vista. en la figura 14. (Moreno, 2001)

Figura 14

Comportamiento de la acción proporcional



Nota: Trazo de la banda proporcional en $e(t)$

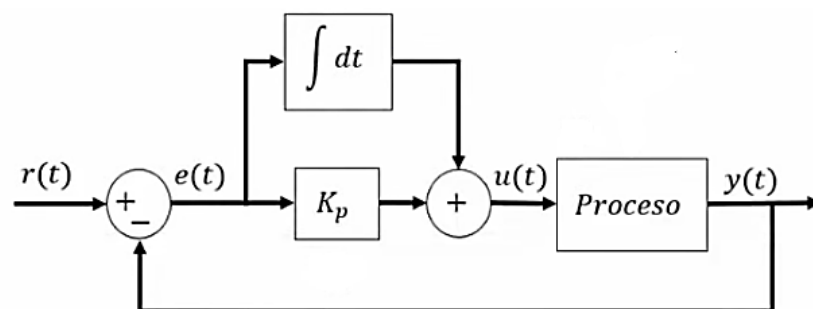
2.2.10.2. Acción de control integral (I)

La integración temporal es realizada por la parcela integradora o control integral, mediante la señal de error que ingresa al controlador que está representada en la figura 15.

Es utilizada generalmente para conseguir una precisión en la variable del sistema a controlar y su acción se regula mediante la constante integral K_i . La acción del sistema integral toma datos de los errores pasados y los integra a lo largo del tiempo, es decir, acumula el valor del error pasado. (Moreno, 2001)

Figura 15

Bloque de control integradora



Nota: bloque proporcional e integral realimentado.

Integración del error proporcional.

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (3)$$

$$u(t) = \int_0^{t_i} e(t) dt \quad (4)$$

Por lo tanto, se añade una ganancia integral K_i al control integral para acelerar o suavizar esta respuesta en el sistema. Así, la acción de control integral vendrá dada por:

$$u(t) = K_i \int_0^{t_i} e(t) dt \quad (5)$$

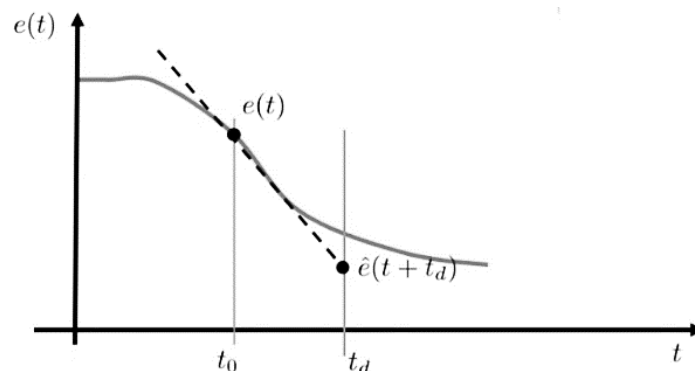
2.2.10.3. Acción de control derivativo (D)

El control derivativo se suele utilizar para aumentar la amortiguación en un sistema para conseguir una respuesta menos oscilatoria en la señal de salida controlada, gracias a la constante derivada K_d el resultado se modifica. Para efecto derivativo la desventaja es de poder introducir la inestabilidad del circuito de control.

La acción derivada también sirve para proporcionar al controlador una función para predecir el comportamiento futuro de señal de error que percibe. Este tipo de pronóstico se lleva a cabo calculando la derivada del error en el instante actual, lo que equivale a hallar la tangente en ese punto y proyectar cómo podría evolucionar el error en el futuro. Para esto, se utiliza una aproximación basada en las series de Taylor, que está representada en la figura 16. (Moreno, 2001)

Figura 16

Aproximación de series de Taylor



Nota: Se muestra la suma de los primeros términos de su serie de Taylor.

Error en series de Taylor, viene representado por la siguiente serie infinita.

$$e(t + t_d) = e(t) + t_d \frac{de(t)}{dt} + \frac{t_d^2}{2!} \frac{d^2e(t)}{dt^2} + \dots \quad (6)$$

$$e(t + t_d) = e(t) + t_d \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

2.2.11. Diseño de sistemas de control proporcional integral y derivativo

(PID)

Las especificaciones de diseño se utilizan a menudo para hacer el sistema y cómo hacerlo. Esta definición es específica para cada una de las aplicaciones y a menudo introducen definiciones tales como la estabilidad relativa, exactitud en modo estacionario, el resultado transitoria y características de resultado de frecuencia, puede haber definiciones complementarias para la sensibilidad y cambio de criterios.

El diseño de un sistema de control puramente lineal puede llevarse a cabo tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia. Sin embargo, cuando se busca cumplir con ciertos requisitos específicos, es más conveniente trabajar en el dominio del tiempo.

Parámetros como el sobreimpulso máximo, el tiempo de subida y el tiempo de establecimiento se definen en respuesta a una entrada escalón unitario, razón por la cual se emplean en el diseño basado en el dominio del tiempo. Las especificaciones típicas en el dominio de frecuencia suelen utilizarse junto con las herramientas de diagrama de Bode, el diagrama polar, el diagrama de fase de ganancia del diagrama de ziegler-Nichols. (Kuo, 1996)

2.2.11.1. Diseño con el controlador proporcional derivativo (PD)

Para entender este controlador, primero consideramos una parte PD del controlador, se tiene la figura 17 del diagrama de bloques para una estructura de control realimentado, de manera arbitraria se tiene un prototipo de proceso de orden de grado dos para una función de transferencia. (Kuo, 1996)

Ecuación característica de segundo orden.

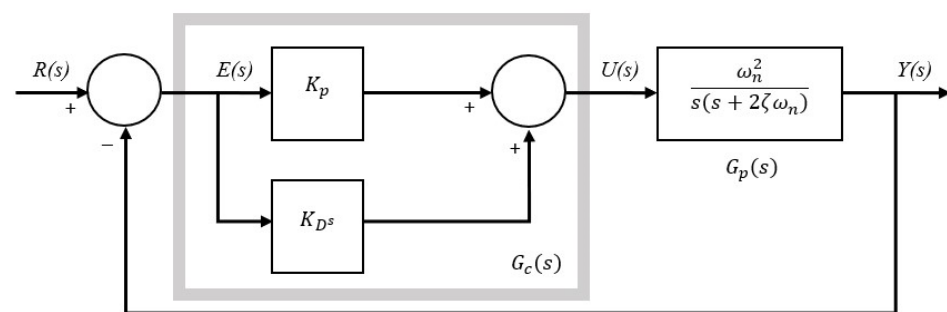
$$G_P = \frac{\omega_n^2}{s(s + 2\zeta\omega_n)} \quad (8)$$

Ecuación proporcional-derivativo (PD) con función de transferencia.

$$G_C = K_P + K_D s \quad (9)$$

Figura 17

Sistema con control PD



Nota: tomado de (Kuo, 1996)

- **Explicación en el dominio del tiempo del control PD**

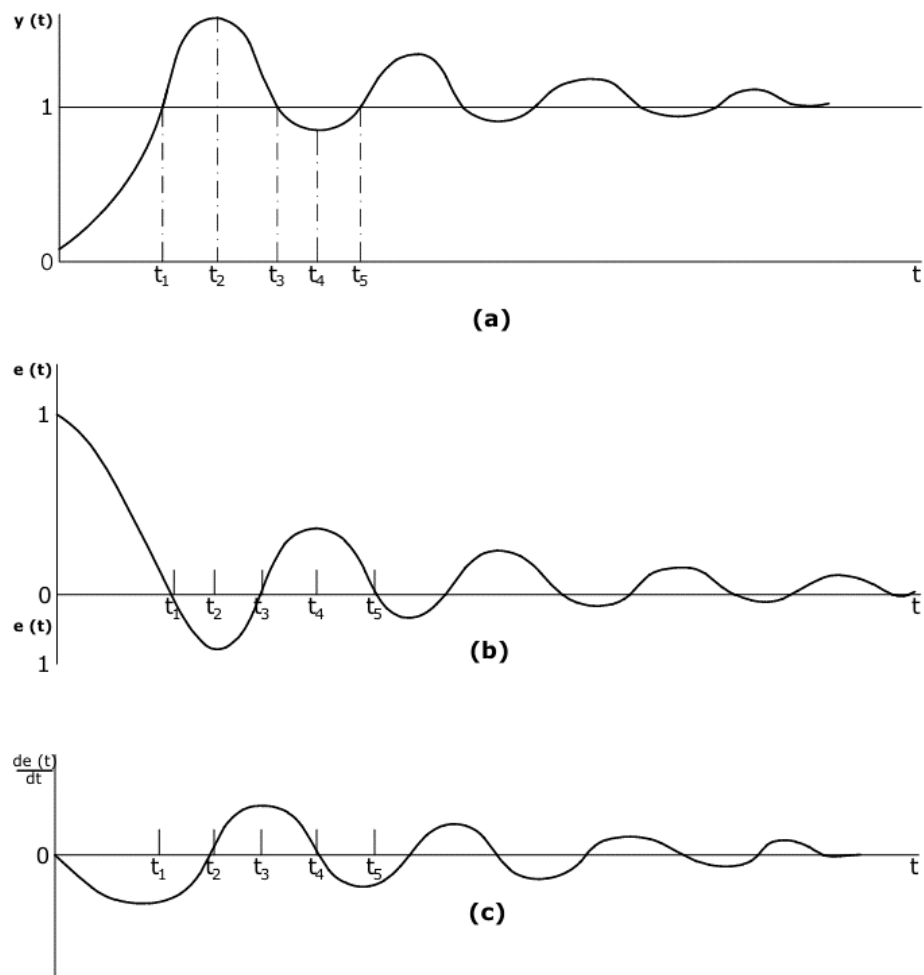
La respuesta transitoria de un sistema de control PD puede describirse en términos de su comportamiento temporal, tal como se ilustra

en la figura 18. Una respuesta de escalón unitario en un sistema estable de control proporcional está representada en la figura 18(a) el cual tiene un sobreimpulso máximo aproximadamente grande y oscilatorio.

La definición entre la entrada y salida del escalón unitario $y(t)$ es la señal de error, y la derivada en el tiempo $de(t)/dt$ como se muestra en la figura 18(b) y (c) correspondiente. (Kuo, 1996)

Figura 18

Formas de onda de la señal.



Nota: Donde $y(t)$, $e(t)$ y $(de(t))/dt$, lo que Muestra el Efecto Derivado del Control. (a) Respuesta Unitaria a Nivel. (b) Señal de Error. (c) la Tasa de Cambio de la Señal de Error a lo Largo del Tiempo. (Kuo, 1996)

- **Explicación del control PD en el dominio de la frecuencia.**

El diseño en el dominio de la frecuencia y la expresión de la función de transferencia del controlador PD se ilustran según lo indicado en la ecuación. Ecuación del controlador proporcional derivativo.

Es posible integrar la ganancia en serie del sistema con la ganancia proporcional del control K_P , de modo que la ganancia del controlador PD en frecuencia cero pueda interpretarse como unidad. La figura 19 ilustra esta representación, junto con las características del filtro pasaaltas que posee un controlador PD.

$$G_c(s) = K_P + K_D s = K_P \left(1 + \frac{K_D}{K_P} s \right) \quad (10)$$

Con el fin de aumentar el margen de fase en un sistema de control, se recurre a la propiedad de adelanto de fase. Sin embargo, en el caso del controlador PD, la característica de su magnitud tiende a desplazar la frecuencia de cruce hacia un valor más elevado, por ello involucra la localización de la frecuencia de corte del controlador $\omega = K_P/K_D$, lo que permite una mejora dentro del margen de fase correspondiente a la nueva frecuencia de cruce en ganancia.

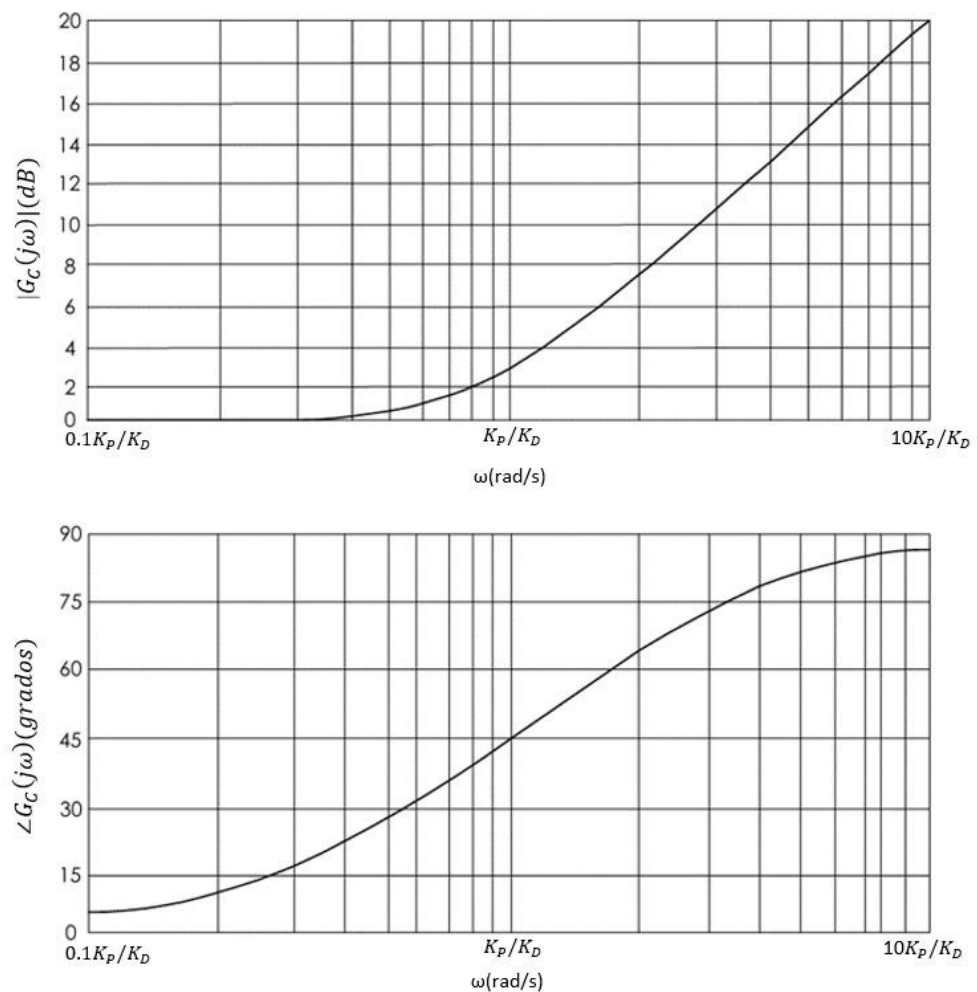
En un sistema determinado, existe un rango óptimo de valores para la relación K_P/K_D que permite mejorar el amortiguamiento del sistema. La elección de los valores K_P y K_D , se realiza considerando aspectos prácticos relacionados con la implementación física del controlador PD. En el análisis en el dominio de la frecuencia, otro efecto importante proviene de las propiedades del filtro pasaaltas.

Este efecto generalmente causa un aumento del ancho de banda (BW) del sistema y una disminución del tiempo de subida ante una señal escalón.

El filtro pasaaltas corresponde al componente derivativo y representa una ventaja práctica del controlador PD, aunque también amplifica el ruido de alta frecuencia presente en la señal de entrada. (Kuo, 1996)

Figura 19

Traza de Bode $1 + K_D s / K_P$. $K_P = 1$



Nota: tomado de (Kuo, 1996)

2.2.11.2. Diseño con el controlador PI

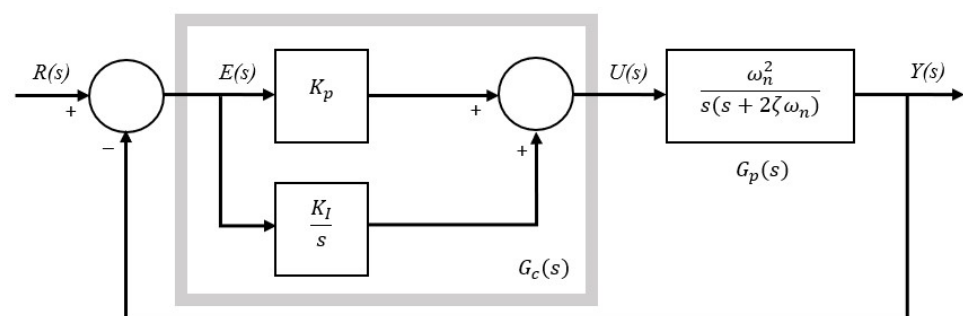
En la parcela integral de un controlador PID con respecto al tiempo en entrada del controlador se produce la señal proporcional a la integral con relación al tiempo, la figura 20, muestra el prototipo de grado dos el controlador PI en configuración serie. (Kuo, 1996)

Función de transferencia del controlador PI.

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (11)$$

Figura 20

Modelo de sistema con control PI



Nota: tomado de (Kuo, 1996)

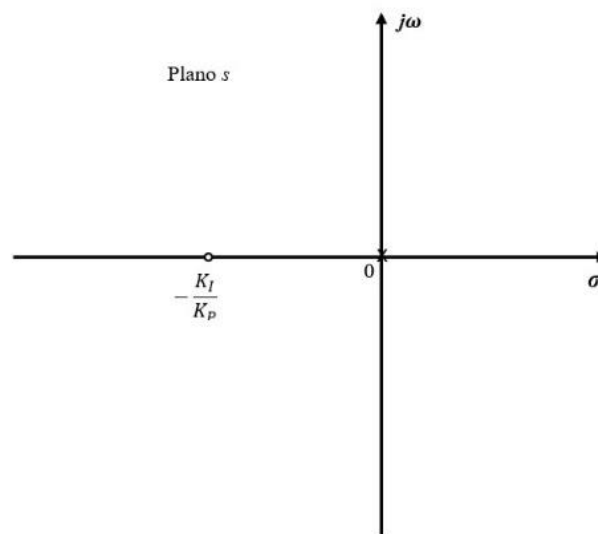
- **Control PI en el dominio del tiempo**

La estructura de polos y ceros del controlador PI se muestra en la Figura 21. En dicha imagen se observa que el controlador PI reduce el error en estado estacionario, aunque esto puede afectar negativamente la estabilidad del sistema. No obstante, se demostrará la elección correcta de la ubicación del cero $G_c(s)$ donde puede mejorar la amortiguación y el error de estado estable, donde el control PI es esencialmente es un filtro pasa bajos, tendrá un crecimiento el sistema compensado. Un método

viable para diseñar un controlador PI consiste en ubicar el cero en $s = K_i/K_p$ colocándolo cerca del origen y lejos de los polos más significativos del proceso. Además, los valores K_p y K_i deben seleccionarse de manera que sean relativamente pequeños. (Kuo, 1996)

Figura 21

Configuración de polos y ceros de un controlador PI



Nota: tomado de (Kuo, 1996)

- **Análisis en el dominio de la frecuencia y elaboración del controlador proporcional integral**

En el diseño de dominio de la frecuencia, el controlador PI su función de transferencia es escribe de la forma del controlador PI.

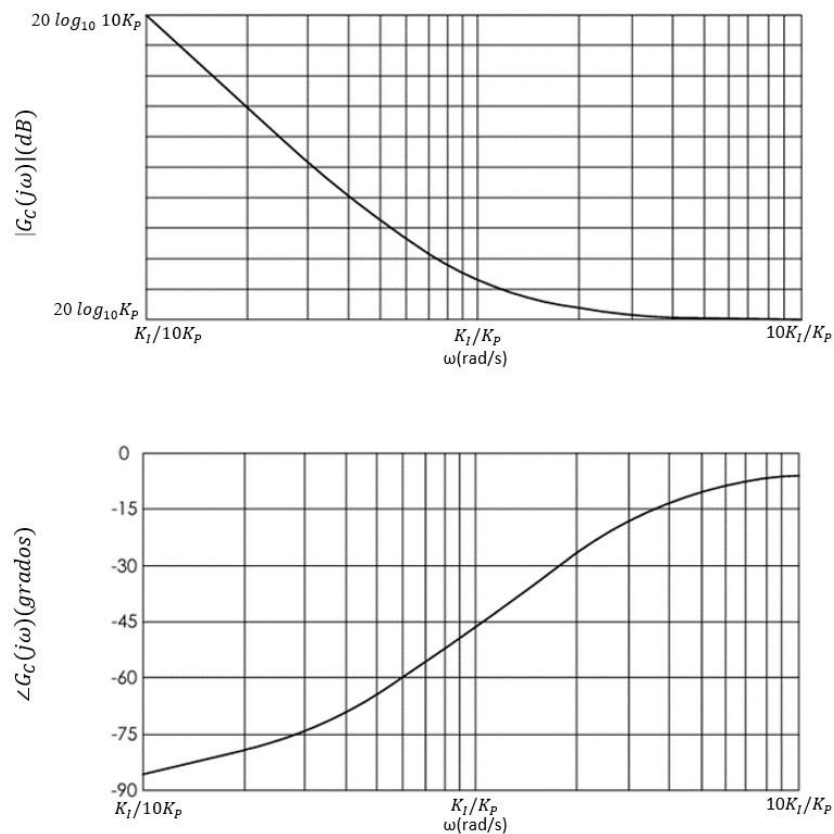
$$G_c(s) = K_p \frac{K_i}{s} = \frac{K_i[1 + (K_p/K_i)s]}{s} \quad (12)$$

La traza en diagrama Bode de $G_c(j\omega)$ se detalla en la figura 22. Se observa la magnitud $G_c(j\omega)$ en $\omega = \infty$ es $20 \log_{10} K_p dB$, si el valor de K_p es menor que 1, lo que representa una atenuación. La atenuación se utiliza

para mejorar la estabilidad de sistema. Siempre será negativa la fase $G_c(j\omega)$, lo que es perjudicial para la estabilidad. Por ello, $\omega = K_i/K_p$, debe ponerse en la frecuencia de corte para el controlador, debe establecerse lo más a la izquierda que permita el ancho de banda requerido. para que las propiedades de desplazamiento o atraso $G_c(j\omega)$ no deterioren el límite de fase obtenido por el sistema. (Kuo, 1996)

Figura 22

Trazas de Bode del controlador PI $G_c(s)=K_p + K_i/s$



Nota: tomado de (Kuo, 1996)

2.2.11.3. Diseño con el controlador PID

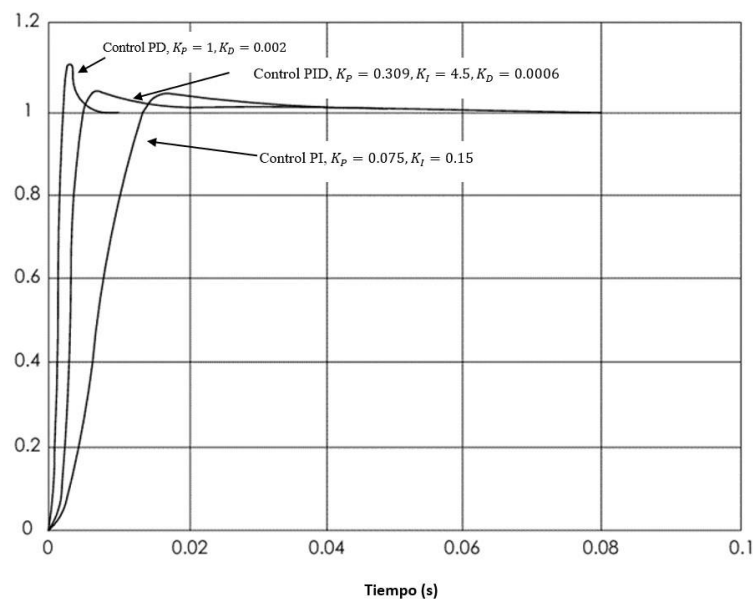
De la discusión previa se deduce claramente que el controlador PD puede aumentar el amortiguamiento del sistema sin que esto influya en la respuesta en estado estacionario. Al mismo tiempo se puede mejorar la

estabilidad del error de estado estable con control PI, pero se incrementa el tiempo de subida. Por ello emplearemos un control PID lo cual mejorara las características de ciertos controladores como el PI. Se define el diseño del controlador PID siguiendo procedimientos y respuestas que se obtienen como se muestra en la figura 23 la ecuación 13, muestra el controlador PID. (Kuo, 1996)

$$G_S = K_P + K_D S + \frac{K_I}{S} \quad (13)$$

Figura 23

Respuesta al escalón del sistema con los controles PD, PI y PID



Nota: tomado de (Kuo, 1996)

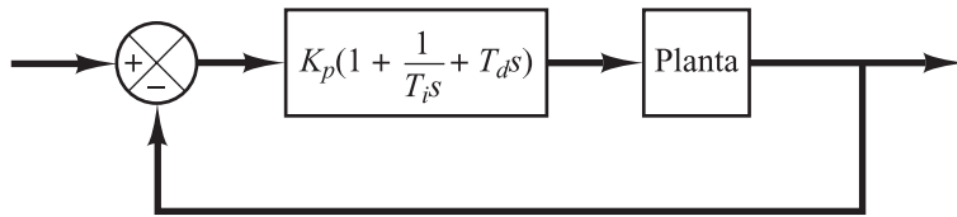
2.2.12. Sintonía de controladores PID

Con un modelo matemático de la planta, es posible utilizar diferentes técnicas de diseño para establecer los parámetros del controlador, asegurando que se cumplan las especificaciones de respuesta transitoria y estado estable en un sistema de lazo cerrado, como se muestra en la figura 24. Sin embargo, si la planta

es compleja y no se puede obtener un modelo matemático, resultará casi imposible aplicar un método analítico para diseñar el controlador PID. En tales casos, se recurrirá a métodos experimentales para la sintonía del PID. (Ogata, 2010)

Figura 24

Diagrama de bloque de control PID de una planta



Nota: tomado de (Ogata, 2010)

Los conocidos controladores PID (derivativo, proporcional e integral) se utilizan considerablemente en plantas industriales como minería, petróleo, fábricas de automóviles y otros como sistemas de control la ecuación 14, muestra la sintonía de Controladores PID usando Ziegler-Nichols.

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (14)$$

Donde: K_p se conoce como la ganancia proporcional, τ_d es el tiempo derivativo, τ_i tiempo integral, $e(t)$ es el error y la salida del controlador viene dada por $u(t)$.

$$u(t) = K_p \left[e(t) \frac{1}{\tau_i} + \int_0^t e(t) dt + \tau_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (15)$$

Podemos describir de la ecuación 16, en términos de ganancia de la siguiente manera:



$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (16)$$

K_p viene a ser ganancia proporcional, K_i es la ganancia integral y por último la ganancia derivativa K_d .

2.2.12.1. Para sintonía de controladores PID con reglas de Ziegler-Nichols

Las reglas que propusieron Ziegler y Nichols para determinar los valores en la parcela proporcional K_p , tiempo derivativo K_d , y el tiempo integral que viene expresado por K_i , donde se basa en la respuesta transitoria de una planta, donde propone mediante experimentos realizar o determinar parámetros de controladores o sintonía PID.

Las reglas propuestas de Ziegler y Nichols están disponibles en publicaciones técnicas como también los que fabrican los controladores.

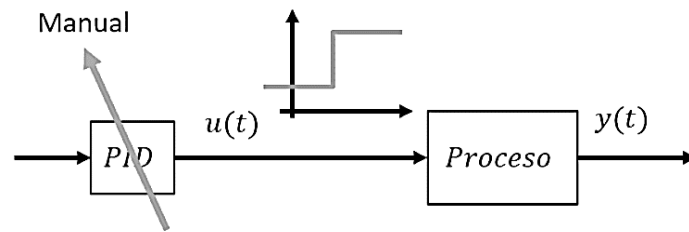
Ziegler y Nichols opto por dos métodos o reglas de sintonía, se detallará fojas abajo de los dos métodos. (Ogata, 2010)

- **Ziegler y Nichols método 1**

Para el método 1 se realiza con un sistema de lazo abierto, Ziegler y Nichols proponen que se debe colocar en modo manual el controlador para así poder variar o generar una señal del tipo escalón en la salida del controlador PID que representa esquemáticamente la figura 25.

Figura 25

Bloque de lazo abierto con entrada de escalón unitario



Nota: Se muestra un esquemático de control manual al proceso.

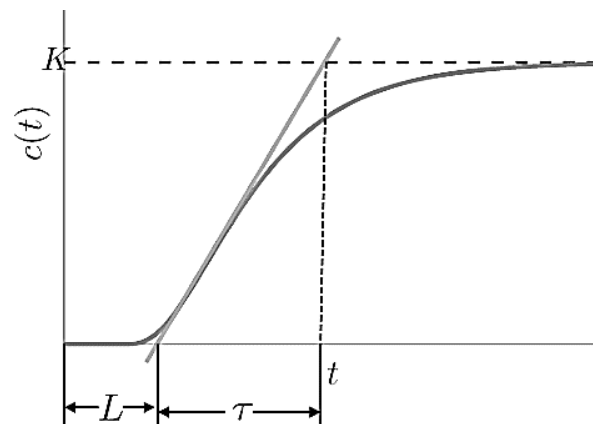
Esto significa que la planta recibirá una señal de entrada de tipo escalonada (generalmente un escalón unitario) con la respuesta en la salida ya se puede obtener los parámetros para el control PID, según Ziegler y Nichols el comportamiento de la señal de salida de reacción debe de ser sigmoideal, lo que no debe tener el sistema es sobre impulso en lazo abierto, también no debe tener una constante o dinámica que crezca exponencialmente en el tiempo. La curva sigmoideal viene definida por dos constantes que son, la constante de tiempo que está definido por τ , y el tiempo de retardo L es decir que el sistema es de primer orden con retardo y su función de transferencia esta dado por la siguiente notación en la ecuación 17, se muestra la función de transferencia de primer orden.

$$G_p(s) = \frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{Ls}}{\tau s + 1} \quad (17)$$

Ya conociendo el comportamiento del sistema de primer orden podemos obtener los parámetros, la constante de tiempo y el retardo se obtendrá dibujando la tangente en el punto de inflexión de la curva sigmoideal donde la línea tangente cruza con el eje del tiempo de las intersecciones $c(t) = K$ como se aprecia en la figura 26.

Figura 26

Curva sigmoideal para determinar las intersecciones



Nota: Curva sigmoidea en forma de "S" para determinar modelo matemático de primer orden.

Ziegler y Nichols proponen un control PID determinando los valores de K_p , K_i y K_d según a la siguiente tabla 2 que define las ecuaciones para cada ganancia del control PID.

Tabla 2

Regla de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón para método 1

Controlador	K_p	τ_i	τ_d
P	$\frac{\tau}{KL}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{\tau}{KL}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{\tau}{KL}$	$2L$	$0.5L$

Nota: tomado de (Ogata, 2010)

Sustituimos los valores en la ecuación 18, del controlador PID.

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (18)$$

$$G_c(s) = 1.2 \frac{\tau}{KL} \left(1 + \frac{1}{2Ls} + 0.5Ls \right) \quad (19)$$

$$G_c(s) = 0.6 \frac{\tau}{K} \frac{\left(s + \frac{1}{L} \right)^2}{s} \quad (20)$$

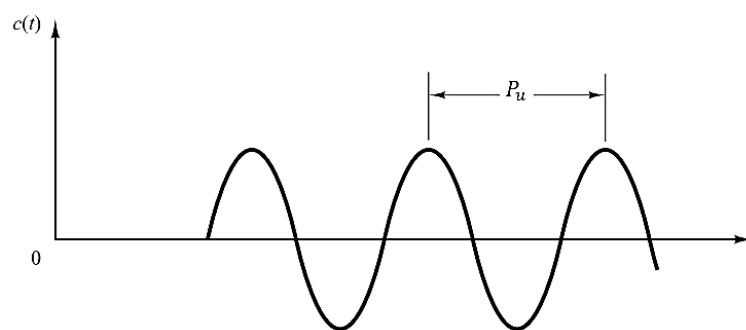
Se puede ver en la ecuación 20, del controlador que coloca un polo en el origen y dos ceros en $s = -1/L$.

- **Ziegler y Nichols método 2**

Para el segundo método debemos de realizar para un sistema de lazo cerrado donde colocaremos las parcelas integral y derivativa en cero, solo aumentaremos o variaremos experimentalmente la parcela proporcional del controlador permitiendo conseguir una salida del tipo oscilatorio con amplitud constante. La oscilación se puede apreciar en la figura 27. (Ogata, 2010)

Figura 27

Frecuencia sostenida con periodo P_u



Nota: la P_u se mide en segundos. (Ogata, 2010)

Para que presenten oscilaciones en lazo cerrado de control, el sistema debe de ser de orden superior. Para determinar la ganancia límite, es necesario encontrar una respuesta oscilatoria con amplitud constante, lo cual indicará dicha ganancia o ganancia crítica K_u .

Tabla 3*Sintonía de Ziegler-Nichols para la ganancia crítica K_u y periodo crítico* *P_u método 2*

Controlador	K_p	τ_i	τ_d
P	$0.5K_u$	∞	0
PI	$0.45K_u$	$\frac{L}{0.3}P_u$	0
PID	$0.6K_u$	$0.5P_u$	$0.125P_u$

Nota: Ecuaciones desarrollados por Ziegler-Nichols (Ogata, 2010)

Del grafico obtenido podremos calcular la frecuencia crítica $P_u = 2\pi/\omega_u$. y el periodo crítico denotado por P_u con los parámetros mencionados ya se puede encontrar las constantes del controlador PID, que se muestra en la tabla 3 de la sintonía de Ziegler-Nichols. (Ogata, 2010).

Nótese el control PID ajustado por el método 2 de la regla de Ziegler-Nichols donde sustituimos estos valores en la ecuación PID se tiene la ecuación 21, del controlador PID para controlar el sistema.

$$G_c(s) = 0.6K_u \left(1 + \frac{1}{0.5P_u s} + 0.125P_u s \right) \quad (21)$$

$$G_c(s) = 0.075K_u P_u \frac{\left(s + \frac{4}{P_u} \right)^2}{s} \quad (22)$$

Se puede observar que el control coloca 1 polo en el origen y 2 ceros en $s = -4/P_u$. (Ogata, 2010).

2.2.12.2. Criterio para la estabilidad de Routh Hurwitz

La estabilidad es lo más importante en los sistemas de control lineal, en otras palabras, ¿bajo qué condiciones un sistema es inestable? Si es inestable ¿Cómo lograr la estabilización de un sistema de control?

Un sistema de control lineal se considera estable cuando todos sus polos están ubicados en el semiplano izquierdo del plano complejo s . La función de transferencia en bucle cerrado es de la forma polinomial en mayor parte de los sistemas lineales en la ecuación 24, se tiene el sistema polinomial de un sistema de lazo cerrado. (Ogata, 2010)

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b_0s^m + b_1s^{m-1} + \dots + b_ms + b_m}{a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_ns + a_n} \quad (23)$$

Donde a y b son constantes y se cumple que $m \leq n$. El criterio de Routh-Hurwitz permite determinar si un sistema es estable al indicar cuántos polos del lazo cerrado se encuentran en el semiplano derecho del plano complejo s , sin necesidad de factorizar el polinomio.

Este criterio analiza la presencia o ausencia de raíces inestables en la ecuación polinómica y es aplicable únicamente a polinomios con un número finito de términos.

Para usar el criterio de Routh-Hurwitz, se parte de los coeficientes de la ecuación característica y se sigue un procedimiento específico. (Ogata, 2010)

- Se escribe de la siguiente manera el polinomio en s .



$$a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_n s + a_n \quad (24)$$

- consideramos que $a_n \neq 0$; es decir que se elimina cualquier raíz cero, y los coeficientes son cantidades reales.
- Si al menos uno de los coeficientes es negativo o igual a cero, el sistema presenta raíces imaginarias o con parte real positiva, lo que indica inestabilidad.
- Por esta razón, no es necesario continuar con el análisis. La condición es que todos los coeficientes deben ser positivos. Los coeficientes de un polinomio se pueden factorizar en factores lineales y cuadráticos de la forma $(s + a)$ y $(s^2 + bs + c)$ los valores reales a, b y c, del polinomio están asociados a sus factores.
- Generalmente, los factores lineales generan raíces reales, mientras que los factores cuadráticos dan lugar a raíces complejas. En el caso de un factor cuadrático del tipo $(s^2 + bs + c)$, si los coeficientes b y c son positivos, entonces las raíces tendrán partes reales negativas.
- Cabe señalar que una condición necesaria, aunque no suficiente para que el sistema sea estable es que todos los coeficientes de la ecuación (como en la ecuación 25) tengan signo positivo. (Ogata, 2010)
- A partir del polinomio característico, los términos se organizan en filas y columnas de acuerdo con un patrón específico.

$$\begin{array}{c|cccccc}
 s^n & a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & \dots \\
 s^{n-1} & a_1 & a_3 & a_5 & a_7 & \dots
 \end{array}$$



s^{n-2}	b_1	b_2	b_3	b_4	...
s^{n-3}	c_1	c_2	c_3	c_4	...
s^{n-4}	d_1	d_2	d_3	d_4	...
.	
.	
.	
s^2	e_1	e_2	e_3	e_4	
s^1	f_1	f_2	f_3		
s^0	g_1	g_2			

Para la formación de filas se continuará hasta que no haya más elementos, el número total de filas es $n + 1$. Donde b_1, b_2, b_3 , etc., son coeficientes, se denotan de la siguiente forma:

$$b_1 = \frac{a_1 a_2 - a_0 a_3}{a_1} \quad (25)$$

$$b_2 = \frac{a_1 a_4 - a_0 a_3}{a_1} \quad (26)$$

$$b_3 = \frac{a_1 a_6 - a_0 a_7}{a_1} \quad (27)$$

Al calcular el valor de b, se procede de igual forma hasta que los demás términos resulten cero.

Se utiliza el mismo esquema de multiplicación cruzada entre los coeficientes de las dos filas que quedan para determinar los valores de c, d, e, y así sucesivamente. En otras palabras:



$$c_1 = \frac{b_1 a_3 - a_1 b_2}{b_1} \quad (28)$$

$$c_2 = \frac{b_1 a_5 - a_1 b_3}{b_1} \quad (29)$$

$$c_3 = \frac{b_1 a_7 - a_1 b_4}{b_1} \quad (30)$$

Y continuamos para d, se tiene:

$$d_1 = \frac{c_1 b_2 - b_1 c_2}{c_1} \quad (31)$$

$$d_2 = \frac{c_1 b_3 - b_1 c_3}{c_1} \quad (32)$$

Este proceso continúa hasta completar la fila n. La tabla completa de coeficientes es triangular.

Tenga en cuenta que, al expandir la tabla, la fila entera y se multiplica o divide por un número positivo esto para simplificar los cálculos numéricos posteriores sin cambiar la conclusión de consistencia.

El criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz aplicado a la ecuación 26 establece que no es necesario conocer los valores exactos de los términos en la primera columna, sino únicamente sus signos.

Esta condición es tanto necesaria como suficiente para asegurar que todas las raíces de la ecuación característica se ubiquen en el semiplano izquierdo del plano complejo s. (Ogata, 2010)

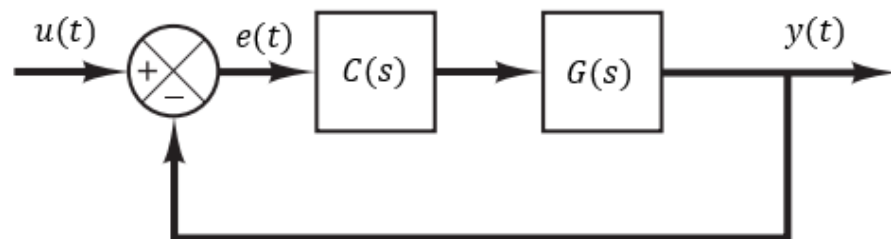
2.2.12.3. Controlador PI asignación de polos

Para esta comprobación, asumiremos que tenemos el modelo matemático o función de transferencia, asumiendo una aproximación matemática de primer orden, donde decimos que el retardo es demasiado pequeño como para considerarlo, y tenemos diagrama de bloques que esta representa en la figura 28.

- **Sistemas de primer orden**

Figura 28

Lazo cerrado con realimentación



Nota: Lazo cerrado con control PID de la planta con entrada $u(t)$, y salida $y(t)$.

La ecuación 33, muestra la función de transferencia del modelo de proceso.

$$G(s) = \frac{k_p}{\tau s + 1} \quad (33)$$

La constante k_p representa la ganancia del proceso, mientras que τ corresponde a la constante de tiempo. En un sistema de primer orden, el proceso alcanza su ganancia estable aproximadamente después de un tiempo igual a, 4τ . Se sabe que la función de transferencia vendría a ser una división de polinomios, de la notación podemos reemplazar que A sea

el denominador, y B el numerador, esto para simplificar las operaciones matemáticas. (Kuo, 1996)

$$G(s) = \frac{k_p}{\tau s + 1} = \frac{A}{B} \quad (34)$$

Función de transferencia del controlador PI.

$$C(s) = k_c \frac{k_p s + 1}{\tau_i s} = \frac{D}{E} \quad (35)$$

De manera similar, la función de transferencia del controlador PI se representa utilizando dos polinomios: D en el numerador y E en el denominador, tal como se indica en la ecuación 36.

A partir de las expresiones del controlador PI y del modelo de planta de primer orden, se derivan las ecuaciones necesarias para obtener la función de transferencia del sistema en lazo cerrado.

$$H(s) = \frac{\frac{D A}{E B}}{1 + \frac{D A}{E B}} \quad (36)$$

$$H(s) = \frac{\frac{D A}{E B}}{\frac{E B + D A}{E B}} \quad (37)$$

$$H(s) = \frac{D A}{E B + D A} \quad (38)$$

Ahora, si sustituimos el valor de cada polinomio, tenemos nuestra expresión para el sistema en lazo cerrado.

$$H(s) = \frac{k_c k_p (\tau_i s + 1)}{\tau_i s (\tau s + 1) + k_c k_p (\tau_i s + 1)} \quad (39)$$

$$H(s) = \frac{k_c k_p (\tau_i s + 1)}{\tau_i s \tau s^2 + (\tau_i + k_c k_p \tau_i) s + k_c k_p} \quad (40)$$

$$H(s) = \frac{\frac{k_c k_p}{\tau_i \tau} (\tau_i s + 1)}{s^2 + \frac{1}{\tau} (1 + k_c k_p) s + \frac{k_c k_p}{\tau_i \tau}} \quad (41)$$

La función de transferencia (FT) en lazo cerrado, el denominador se conoce como la ecuación característica del sistema en lazo cerrado, la dinámica del sistema lo determinarán los polos que se encuentran en la FT.

La técnica de asignación de polos comprende en definir los polos en el lugar que se asignó para poder definir cuáles son los parámetros del controlador PI.

Por ello se tiene dos polos y un cero en un sistema de segundo orden. La FT de segundo orden es la forma canónica y está dada por la siguiente expresión. (Paz et al., 2013)

Función de transferencia de segundo orden.

$$G_d(s) = \frac{K \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \quad (42)$$

El sobrepaso máximo y el tiempo de establecimiento son parámetros clave que caracterizan la dinámica de los sistemas de segundo orden subamortiguados, ya que están directamente vinculados con la respuesta dinámica del proceso, tal como se indica en la ecuación 44. Se puede aproximar el sobreimpulso máximo M_p que esto solo se aplica a

sistemas subamortiguados o sea con $0 < \zeta < 1$, se muestra la ecuación de máximo sobreimpulso.

$$M_p = e^{\frac{-\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (43)$$

Ecuación de factor de amortiguamiento.

$$\zeta = \frac{\ln\left(\frac{M_p}{100}\right)^2}{\sqrt{\pi^2 + \ln\left(\frac{M_p}{100}\right)^2}} \quad (44)$$

La función de transferencia convencional de segundo orden viene dada en las ecuaciones 42 y 43, igualaremos los denominadores de $H(s)$ y $G_d(s)$ de esta forma podemos determinar nuestra ganancia k_c y τ_i sería el tiempo integral.

$$s^2 + \frac{1}{\tau}(1 + k_c k_p)s + \frac{k_c k_p}{\tau_i \tau} = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = s^2 + \alpha_1 s + \alpha_2 \quad (45)$$

$$s^2 + \frac{1}{\tau}(1 + k_c k_p)s + \frac{k_c k_p}{\tau_i \tau} = s^2 + \alpha_1 s + \alpha_2 \quad (46)$$

Para obtener la ecuación, igualamos los coeficientes de la expresión.

$$\frac{1}{\tau}(1 + k_c k_p) = \alpha_1; \quad k_c = \frac{\alpha_1 \tau - 1}{k_p} \quad (47)$$

$$\frac{k_c k_p}{\tau_i \tau} = \alpha_2; \quad \tau_i = \frac{k_c k_p}{\alpha_2 \tau} \quad (48)$$

Este es el tiempo que queremos establecer para que el proceso alcance el estado estable, 2% o del 5% son las bandas de tolerancia y

debemos de definir. Se establece para un factor de amortiguamiento de $0 < \zeta < 1$.

Establecimiento en la banda de 5% y 2%.

$$t_s = \frac{3}{\zeta\omega_n} ; 5\% \quad (49)$$

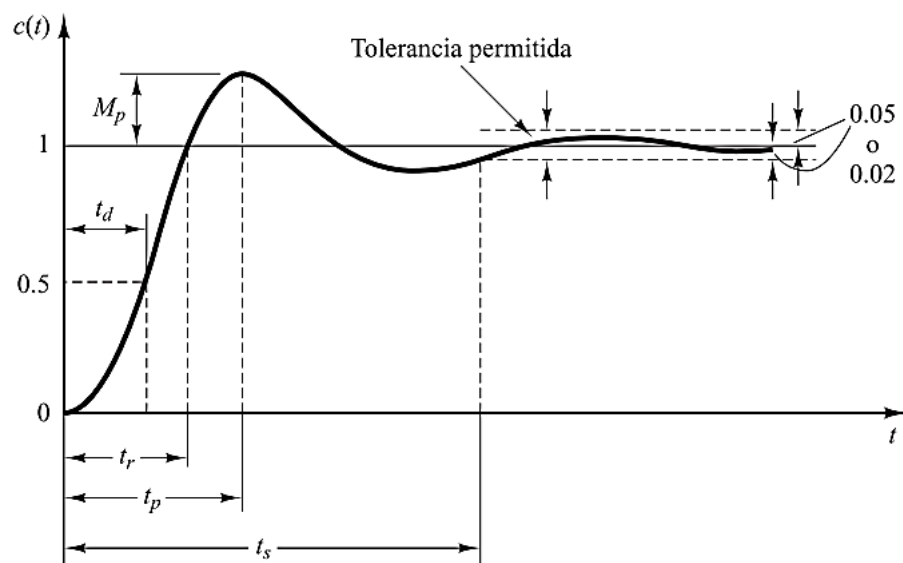
$$t_s = \frac{4}{\zeta\omega_n} ; 2\% \quad (50)$$

- **Sistemas de segundo orden**

Las oscilaciones presentadas en una respuesta transitoria de segundo orden como se observa en la figura 29, antes de alcanzar un estado estable siempre se dará. Para una entrada del tipo escalón unitario en respuesta transitoria de un sistema de control es necesario especificar lo siguiente. (Ogata, 2010)

Figura 29

Curva de respuesta a escalón unitario con tolerancias permitidas



Nota: tomado de (Ogata, 2010)

Donde se define de la figura 29, está representada lo siguiente.

- Sobreelongación, M_p
- Tiempo pico, t_p
- Tiempo de asentamiento, t_s
- Tiempo de retardo, t_d
- Tiempo de subida, t_r

La función de transferencia de segundo orden se obtiene de forma análoga al método anterior, partiendo del desarrollo de la ecuación del modelo del proceso junto con el control PI, tal como se observa en la expresión correspondiente a la función de transferencia del sistema compuesto por el proceso y el controlador PI.

$$G_d(s) = \frac{K \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} = \frac{k}{s^2 + as + b} = \frac{A}{B} \quad (51)$$

$$K_c = \frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s} = \frac{K_c s + K_i}{s} = \frac{D}{E} ; \quad K_i = \frac{K_c}{\tau_i} \quad (52)$$

Función de transferencia en lazo cerrado.

$$H(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} = \frac{\frac{D A}{E B}}{1 + \frac{D A}{E B}} = \frac{\frac{D A}{E B}}{\frac{EB + DA}{EB}} = \frac{DA}{EB + DA} \quad (53)$$

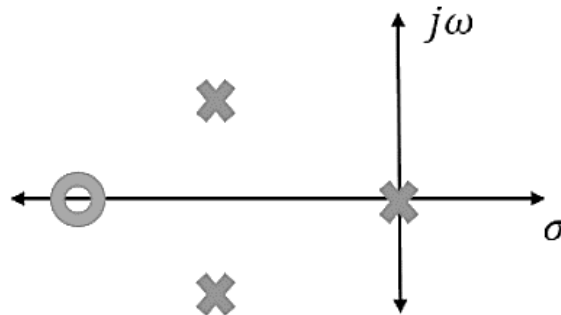
$$H(s) = \frac{k(K_c s + K_i)}{s^3 + as^2 + (b + kK_c)s + kK_i} \quad (54)$$

$$s^3 + as^2 + (b + kK_c)s + kK_i = 0 \quad (55)$$

Cuando la ecuación característica en lazo cerrado está dada mediante el denominador de la FT, y ubicamos en el plano complejo a los polos y ceros que se aprecia en la figura 30.

Figura 30

Polos del sistema de tercer orden con cero



Nota: En el plano complejo s se observa un cero y tres polos.

El factor de proporcionalidad β cuya respuesta depende del polinomio característico que se ha establecido, en este caso.

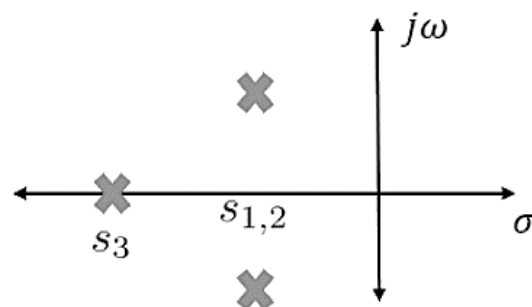
$$P_d = (s + p)(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2) \quad (56)$$

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1 - \zeta^2} \quad (57)$$

$$s_3 = -p \quad (58)$$

Figura 31

Polos en plano complejo



Nota: Se tiene tres polos en el plano complejo, donde el sistema es estable.

$$\beta = \frac{p}{\zeta\omega_n} \quad (59)$$

$$p = \beta\zeta\omega_n \quad (60)$$

Reemplazamos en la ecuación 62, la característica deseada:

$$P_d = (s + \beta\zeta\omega_n)(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2) \quad (61)$$

$$P_d = s^3 + (\beta + 2)\zeta\omega_n s^2 + (2\beta\zeta^2 + 1)\omega_n^2 s + \beta\zeta\omega_n^3 \quad (62)$$

Al incrementar el tiempo el sobre impulso máximo ante una entrada de escalón unitario es reducir con el polo real $s = -p$. La respuesta tiende a ser lenta cuando el polo real está ubicado en la parte derecha de los polos conjugados complejos que está representada en la figura 31. Se encuentra un sistema de ecuaciones con tres incógnitas para parámetros del control PI de la planta segundo orden.

$$s^3 + as^2 + (b + kK_c)s + kK_i = s^3 + (\beta + 2)\zeta\omega_n s^2 + (2\beta\zeta^2 + 1)\omega_n^2 s + \beta\zeta\omega_n^3 \quad (63)$$

$$a = (\beta + 2)\beta\zeta\omega_n \quad (64)$$

$$b + kK_c = (2\beta\zeta^2 + 1)\omega_n^2 \quad (65)$$

$$kK_i = \beta\zeta\omega_n^3 \quad (66)$$

El tiempo de establecimiento T_{ss} , máximo sobreimpulso M_p debemos de definir como condiciones de diseño. Para así poder encontrar la frecuencia natural ω_n y factor de amortiguamiento se muestra en la ecuación 45.

$$0 < \zeta < 1 \quad (67)$$

$$\omega_n = \frac{4}{\zeta T_{ss}} \quad (68)$$

Para resolver el diseño, podemos determinar las incógnitas de las tres ecuaciones formuladas anteriormente:

$$\beta = \frac{a}{\zeta \omega_n} - 2 \quad (69)$$

$$K_c = \frac{(2\beta\zeta^2 + 1)\omega_n^2 - b}{k} \quad (70)$$

$$K_i = \frac{\beta\zeta\omega_n^3}{k} \quad (71)$$

2.2.13. Sistemas de control digital

La caracterización de los sistemas de control automático se basa en la transición de controles analógicos hacia sistemas digitales. El empleo de computadoras facilita la solución de problemas particulares que no pueden abordarse mediante métodos analógicos, lo que justifica su aplicación en tareas de regulación y supervisión de puntos específicos, mejorando la integración entre monitoreo, procesamiento y control de la información.

Como elemento el ordenador ofrece, en comparación de control analógico muchas ventajas para poder cambiar estrategia de control con solo cambiar unas cuantas instrucciones del programa. También el ordenador o computador simultáneamente puede controlar varios procesos complejos y funciones de procesamiento de datos, para seguimiento y vigilancia. (García Jaimes, 2009)



2.2.13.1. Sistemas de tiempo discreto.

También conocidos como sistemas dinámicos los sistemas discretos pueden cambiar en determinado momento una o varias variables, conocidos como momento de muestreo, están denotados por kT ($k = 0, 1, 2, \dots$) es la que realiza una medición física en el momento en la que lee o almacena la memoria del ordenador o computador.

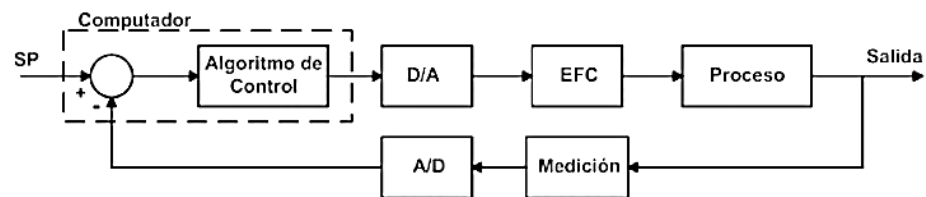
La figura 32 presenta el diagrama de bloques correspondiente a un sistema de control digital. La variable controlada del proceso debe ser medida utilizando sensores, cuya señal debe transformarse en una forma estandarizada, ya sea eléctrica u otra, para luego ser convertida de analógica a digital (A/D). Antes de esta conversión, se emplea un circuito de muestreo y retención (S/H).

La señal digital resultante se compara con un valor de referencia discreto o Set-Point (SP) previamente definido. La computadora calcula el error entre ambos valores y ejecuta el algoritmo de control correspondiente, generando una señal digital de salida.

Esta señal es transformada nuevamente en una señal continua mediante una conversión digital a analógica (D/A) y aplicada al elemento final de control, actuando directamente sobre la variable manipulada. Esto se repetirá constantemente por el computador para el control óptimo de proceso. (García Jaimes, 2009)

Figura 32

Lazo de control digital básico



Nota: tomado de (Garcia Jaimes, 2009)

2.2.13.2. Denotación de los términos empleados

Presentaremos algunas definiciones importantes que son utilizados en el área de instrumentación, control de proceso y análisis digital de sistemas de control de una planta.

- **Proceso y planta**

Para términos, una planta es un objeto físico denominado para controlar, también se puede citar ciertos ejemplos para un entendimiento que vendría a ser, una torre de destilación, un reactor de proceso químico, los intercambiadores de calor y otros, la cual presenta una serie de cambios en un proceso de operación que conducen a un resultado. Pueden ser biológicos, químicos, económicos etc. (Garcia Jaimes, 2009)

- **Transmisor**

Los transmisores son dispositivo que obtienen las variables de un proceso mediante el elemento de sensor primario y del cual sale como una señal estandarizada. Que pueden ser eléctrica (4 a 20 mA o de 0 a 10 Voltios) o neumática (3 a 15 PSI). Hay transmisores inteligentes que usan señales digitales que procesan directamente con el ordenador o computador. (Garcia Jaimes, 2009)



- **Sensor o elemento primario**

El elemento o sensor primario es la que está en contacto con la variable de medida la que da la cantidad de medida al sistema. La salida del elemento primario viene a ser una variable física que puede ser voltaje o corriente u otra variable. (Garcia Jaimes, 2009)

- **Transductor**

Son dispositivos utilizados para transformar una señal física de entrada en otra señal física de salida, como por ejemplo convertir el movimiento en una señal de presión, entre otros. (Garcia Jaimes, 2009)

- **Convertidor**

Son aparatos o dispositivos que al recibir una señal de entrada eléctrica o neumática después de calibrar o modificarlas generan la señal de salida estándar que puede ser utilizada directamente en el actuador, como ejemplo tenemos los convertidores P/I y I/P que vienen a tener una entrada de señal neumática y a la salida una señal electrónica o eléctrica y viceversa. (Garcia Jaimes, 2009)

- **Controlador**

Es un dispositivo encargado de comparar el valor real de una variable controlada (como presión, temperatura, nivel, velocidad o pH) con un valor de referencia o deseado (conocido como Set-Point). A partir de la diferencia entre ambos valores (error), el dispositivo ejecuta de manera automática acciones correctivas con el objetivo de disminuir ese error a cero o al mínimo posible. El controlador también se encarga de

procesar esta información para enviarla al elemento final de control.
(Garcia Jaimes, 2009)

- **Elemento final de control**

El actuador, conocido como el elemento final de control, es el encargado de ejecutar la acción requerida a partir de la señal enviada por el controlador. Este puede consistir en dispositivos como válvulas neumáticas, motores eléctricos, entre otros. En sistemas de control digital, la válvula se acciona mediante un convertidor que transforma la señal eléctrica o digital. En resumen, los elementos finales de control suelen ser actuadores que han sido adaptados para recibir y responder a la señal del controlador. (Garcia Jaimes, 2009)

2.2.13.3. Muestreadores

Los muestreadores son elementos fundamentales en un sistema de control en tiempo discreto. Se basa en tomar o adquirir señales cada T segundos para recibir una señal de entrada, el muestreo debe ser menor a la constante de tiempo de un proceso o planta.

La finalidad de los muestreadores es de convertir la señal analógica en tren de pulsos como muestreo de $0, T, 2T \dots$, el periodo de muestreo es T , se muestra en la figura 33(a) y (b) que representa la señal de analógica y la señal discreta muestreada. (Garcia Jaimes, 2009)

Ecuación de muestra en forma periódica.

$$x^*(t) = x(t)\delta(t) \quad (72)$$

De hecho $\delta(t)$ representa el muestre mediante tren de pulsos unitarios que se observa en la Fig. 33(a).

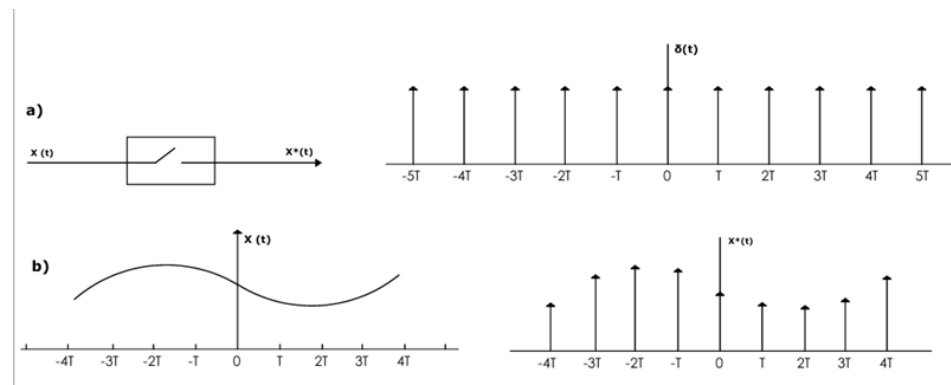
También se muestrea periódicamente, la señal analógica de salida que se expresa en la figura 33(b). (Garcia Jaimes, 2009)

$$x^*(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(t)\delta(t - kT) \quad (73)$$

$$x^*(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(kT)\delta(t - kT) \quad (74)$$

Figura 33

a) Muestreador b) Señales de entrada y salida



Nota: tomado de (Garcia Jaimes, 2009)

Para $t < 0$, los sistemas de control son cero, para la práctica de las señales o funciones temporales, y las ecuaciones se pueden reescribir como:

$$x^*(t) = x(0)\delta(t) + x(T)\delta(t - T) + x(2T)\delta(t - 2T) + \dots \quad (75)$$

A partir de la ecuación previa, la Transformada de Laplace se expresa de la siguiente manera:



$$X^*(t) = x(0) + x(T)e^{-sT} + x(2T)e^{-2sT} + x(3T)e^{-3sT} + \dots \quad (76)$$

simplificando, es decir:

$$X^*(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(kT)e^{-ksT} \quad (77)$$

En el análisis de sistemas de control resulta ser poco practica la ecuación, ya que genera una serie infinita. Donde se quiere expresar $X^*(t)$ de forma cerrada a partir de ello se obtiene resultado mediante la integral de convolución. (Garcia Jaimes, 2009)

$$X^*(t) = \sum \left[\text{Residuos de } x(\lambda) * \frac{1}{1 + e^{-(s-\lambda)T}} \right] \Big|_{\lambda=\text{polos de } x(\lambda)} \quad (78)$$

2.2.13.4.Retenedores

En la práctica, la señal no debe alimentarse al sistema, por lo que es necesario, según el modelo, colocar un dispositivo que cree la señal.

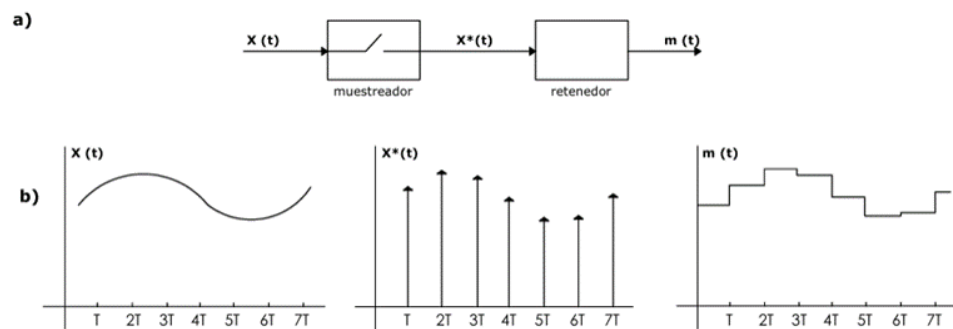
Este dispositivo, denominado retenedor, tiene como finalidad transformar la señal muestreada en una señal continua, de manera que se asemeje o coincida con la señal transmitida al modelo.

El retenedor de orden cero es conocido por convertir la señal muestreada en una señal contante en dos instantes de muestreo, y se utiliza en la reconstrucción de la señal mediante la magnitud de un periodo de muestreo T.

El diagrama de bloques está representado en la figura 34(a), mientras la señal de entrada y salida se puede apreciar en la figura 34(b). (Garcia Jaimes, 2009)

Figura 34

a) Conjunto muestreador-retenedor b) Señales entrada y salida en el Muestreador y en el retenedor



Nota: tomado de (Garcia Jaimes, 2009)

Hay retenedores más complejos que el de orden cero, y estos son de primer y segundo orden que son retenedores de orden superior. Son los dispositivos que reconstruyen de forma exacta la señal que los retenedores de orden cero, tienen una desventaja al introducir un retardo adicional al sistema de control por ello no es recomendable. $H(S)$ es la función de transferencia del retenedor de orden cero. (Garcia Jaimes, 2009)

$$x^*(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(kT)\delta(t - kT) \quad (79)$$

$$X^*(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(kT)e^{-kTS} \quad (80)$$

Se puede expresar como la salida del muestreador:

$$\bar{m}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(kT)[u(t - kT) - u(t - (k + 1)T)] \quad (81)$$

$$\bar{M}(S) = \frac{1}{S}(1 - e^{-ST}) \sum_{k=0}^{\infty} x(kT)e^{kST} \quad (82)$$

$$\sum_{k=0}^{\infty} x(kT)e^{kST} = X^*(S) \quad (83)$$

$$\bar{M}(S) = \frac{1}{S}(1 - e^{-ST})X^*(S) \quad (84)$$

Se tiene la FT del retenedor de orden cero de la ecuación anterior de la siguiente:

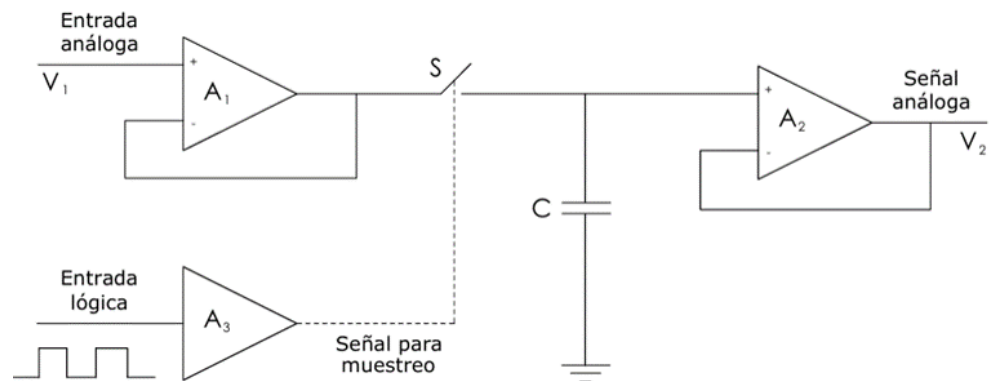
$$H(S) = \frac{\bar{M}(S)}{X^*(T)} = \frac{1 - e^{-ST}}{S} \quad (85)$$

El diagrama esquemático de un circuito de muestreo y retención se presenta en la figura 35. Este circuito integrado contiene todos los componentes internos, excepto el condensador C. Su funcionamiento es el siguiente: cuando el interruptor de estado sólido se activa o se cierra, el condensador C se carga con el voltaje de entrada V_1 de entrada. El amplificador A_1 está estructurado como seguidor de voltaje, y tiene una impedancia de entrada alta y en la salida una impedancia baja lo cual deja que condensador C tienda a cargarse y descargarse rápidamente, siempre y cuando el interruptor (S) este cerrado, el capacitor C sigue a la V_1 . Cuando se desactiva la señal de muestreo, el interruptor de estado sólido se abre, manteniendo el capacitor cargado. Dado que el amplificador operacional A_2 posee una impedancia de entrada muy elevada, su voltaje

de salida permanece constante en el valor que tenía en el instante del muestreo. (García Jaimes, 2009)

Figura 35

Circuito básico para muestreo y retención



Nota: tomado de (García Jaimes, 2009).

2.2.14. Aproximación discreta de control convencionales P, PI y PID

2.2.14.1. Aproximación discreta de control proporcional

El error actuante en un controlador genera una salida proporcional y existe una relación lineal de la posición final de control de elemento con el valor de la variable controlada. Puede afirmarse que existe una proporcionalidad entre el valor de referencia (o deseado) y el valor actual de la variable controlada. (García Jaimes, 2009)

Ecuación de la forma discreta del controlador proporcional continuo.

$$u(t) = k_c e(k) + u_0 \quad (86)$$

$u(t)$ = Salida del controlador.



$e(t)$ = Señal de error actuante.

k_c = Ganancia del controlador. (Parámetro de ajuste).

u_0 = Salida del controlador para error nulo o vías.

$$u(k) = k_c e(k) + u_0 \quad (87)$$

$(k - 1)$ es el instante de tiempo de la salida del controlador, y se expresa:

$$u(k - 1) = k_c e(k - 1) + u_0 \quad (88)$$

Restando las dos ecuaciones anteriores en un tiempo de muestreo, las ecuaciones 88 y 89 se obtiene:

$$u(k) - u(k - 1) = k_c [e(k) - e(k - 1)] \quad (89)$$

$$u(k) = u(k - 1) + k_c [e(k) - e(k - 1)] \quad (90)$$

$$u(k) = k_c e(k) - k_c e(k - 1) + u(k - 1) \quad (91)$$

El algoritmo de control digital está representada por la ecuación 90, para un control digital aplicando en la ecuación la transformada z obtenemos: (García Jaimes, 2009)

$$(1 - z^{-1})U(z) = k_c(1 - z^{-1})E(z) \quad (92)$$

Para obtener el controlador, la FT del controlador proporcional es:

$$C(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = k_c \quad (93)$$



En donde $q_0 = k_c$; viene a ser la FT del pulso para el controlador proporcional. (Garcia Jaimes, 2009)

2.2.14.2. Aproximación discreta para control proporcional integral PI

La señal en la salida presenta un cambio brusco inicial que se relaciona con el error de operación, luego exhibe un cambio a una tasa correspondiente al error. Siempre se utiliza la ecuación de un controlador balanceado de entrada única como se muestra en la ecuación 95. (Garcia Jaimes, 2009)

$$u(t) = k_c e(t) + \frac{k_c}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt \quad (94)$$

$$u(t) = k_c \left[e(t) + \int e(t) dt \right] + u_0 \quad (95)$$

En donde:

$u(t)$ = Salida del controlador.

$e(t)$ = Señal de error.

k_c = Ganancia del controlador.

τ_i = Tiempo Integral.

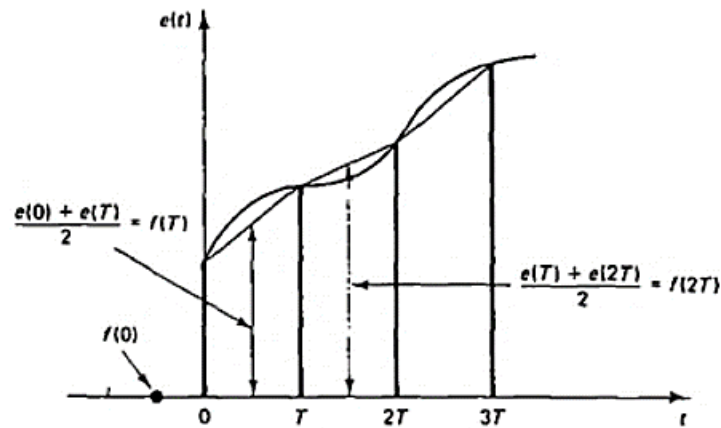
u_0 = Salida del controlador para error nulo.

La ecuación 96, se aplica cuando se utilizan tiempos de muestreo pequeños, permitiendo discretizar una ecuación en diferencias que incluye el término integral.

Para aproximar la integración continua, se emplea el método de integración trapezoidal. Tal como se muestra en la figura 36, el área se calcula a partir del trapecio formado. (Garcia Jaimes, 2009)

Figura 36

Integración trapezoidal del tiempo de muestreo



Nota: tomado de (Garcia Jaimes, 2009)

El área total bajo la curva del error se obtiene al sumar las áreas de los trapecios en los que esta se ha dividido.

$$\int e(t)dt = \sum_{h=0}^k \left[\frac{e(h) + e(h-1)}{2} \right] T_s \quad (96)$$

Reemplazando esta última expresión, los valores de $u(t)$ y $e(t)$ en el instante de muestreo se tiene. (Garcia Jaimes, 2009)

$$u(t) = k_c \left[e(t) + \frac{k_c}{\tau_i} \int_0^t e(t)dt \right] \quad (97)$$

$$u(k) = k_c \left[e(k) + \frac{T_s}{2\tau_i} \sum_{h=0}^k [e(h) + e(h-1)] \right] \quad (98)$$

Así mismo, para el instante $(k - 1)$ resulta que:

$$u(k-1) = k_c \left[e(k-1) + \frac{T_s}{2\tau_i} \sum_{h=0}^k [e(h-1) + e(h-2)] \right] \quad (99)$$

Restando la ecuación 99 de la ecuación 98, se llega a: (un tiempo de muestreo)

$$u(k) - u(k-1) = K_c \left[e(k) - e(k-1) + \frac{T_s}{2\tau_i} \sum_{h=0}^k [e(h) - e(h-2)] \right] \quad (100)$$

Expandimos la sumatoria y se tiene:

$$\sum_{h=0}^4 [e(h) - e(h-2)] = e(h) + e(h-1) \quad (101)$$

$$= [e(0) - e(-2)] + [e(1) - e(-1)] + [e(2) - e(0)] + [e(3) - e(1)] \quad (102)$$

$$= e(4) + e(3) \quad (103)$$

$$u(k) - u(k-1) = k_c \left[e(k) - e(k-1) + \frac{T_s}{2\tau_i} [e(k) + e(k-1)] \right] \quad (104)$$

$$u(k) - u(k-1) = k_c \left[\left(1 + \frac{T_s}{2\tau_i}\right) e(k) - \left(1 - \frac{T_s}{2\tau_i}\right) e(k-1) \right] \quad (105)$$

Esta última ecuación se puede escribir como la ecuación del controlador PI. En donde aplicamos la transformada z a la ecuación 106, para obtener la ecuación 108.

$$u(k) = u(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) \quad (106)$$

$$q_0 = K_c \left[1 + \frac{T_s}{2\tau_i} \right] \quad q_1 = -K_c \left[1 - \frac{T_s}{2\tau_i} \right] \quad (107)$$

Aplicando la transformada z a la ecuación 107, el algoritmo para el controlador proporcional integral es:

$$C(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (108)$$

La ecuación 109, pertenece a la FT de pulso del controlador proporcional integral.

2.2.14.3. Aproximación discreta de control (PID)

Este método de control incorpora la función derivada y su propósito es anticipar el comportamiento del proceso, es decir, prever su dirección futura analizando la velocidad con la que varía el error. De este modo, se obtiene la ecuación correspondiente al controlador PID en su forma continua. (Garcia Jaimes, 2009)

$$u(t) = k_c e(t) \frac{k_c}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt + k_c \tau_d \frac{de(t)}{dt} \quad (109)$$

$$u(t) = k_c \left[e(t) \frac{1}{\tau_i} \int e(t) dt + \tau_d \frac{de(t)}{dt} \right] + u_0 \quad (110)$$

El controlador PID cuenta con tres parámetros que deben ajustarse adecuadamente para asegurar un control efectivo del proceso. Para tiempos de muestreo reducidos, se utiliza la ecuación 111, que se transforma en una ecuación en diferencias. En este proceso, la parte integral se reemplaza por sumas y la parte derivativa por diferencias, aplicando la integración trapezoidal y evaluando las diferencias $m(k) - m(k - 1)$ lo que resulta. Aproximando el término de entrada con la suma trapezoidal y el término de salida con la diferencia de los dos puntos, obtenemos. (Garcia Jaimes, 2009)

$$u(k) = k_c \left[e(k) + \frac{T_s}{2\tau_i} \sum_{h=0}^k [e(h) + e(h-1)] + \frac{\tau_d}{T_s} [e(k) - e(k-1)] \right] \quad (111)$$

$k-1$; es el instante de la salida del controlador.

$$u(k-1) = k_c \left[e(k-1) + \frac{T_s}{2\tau_i} \sum_{h=0}^k [e(h-1) + e(h-2)] + \frac{\tau_d}{T_s} [e(k-1) - e(k-2)] \right] \quad (112)$$

$$= k_c \left[e(k) - e(k-1) + \frac{T_s}{2\tau_i} \sum_{h=0}^k [e(h) - e(h-2)] + \frac{\tau_d}{T_s} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \right] \quad (113)$$

Desarrollando se tiene la siguiente ecuación 115.

$$u(k) - u(k-1) = k_c \left[e(k) - e(k-1) + \frac{T_s}{2\tau_i} [e(k) - e(k-2)] + \frac{\tau_d}{T_s} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \right] \quad (114)$$

$$u(k) - u(k-1) = k_c \left[\left(1 + \frac{T_s}{2\tau_i} + \frac{\tau_d}{T_s} \right) e(k) - \left(1 - \frac{T_s}{2\tau_i} + \frac{2\tau_d}{T_s} \right) e(k-1) + \frac{\tau_d}{T_s} e(k-2) \right] \quad (115)$$

La última ecuación del PID podemos reescribir como:

$$u(k) - u(k - 1) = q_0 e(k) + q_1 e(k - 1) + q_2 e(k - 2) \quad (116)$$

$$u(k) = q_0 e(k) + q_1 e(k - 1) + q_2 e(k - 2) - u(k - 1) \quad (117)$$

Al aplicar la transformada z a la ecuación 117, se obtiene el algoritmo de control discreto para un controlador PID, como se presenta en la ecuación 118. (Garcia Jaimes, 2009)

$$C(z) = \frac{u(z)}{E(z)} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} = \frac{q_0 z^2 + q_1 z + q_2}{z(z - 1)} \quad (118)$$

La ecuación 119, es la FT de pulso del controlador proporcional integral y derivativo. (Garcia Jaimes, 2009)

$$q_0 = K_c \left[1 + \frac{T_s}{2\tau_i} + \frac{\tau_d}{T_s} \right] \quad q_1 = -K_c \left[1 - \frac{T_s}{2\tau_i} + \frac{2\tau_d}{T_s} \right] \quad q_2 = \frac{K_c \tau_d}{T_s} \quad (119)$$

2.2.15. Monitorización

En la actualidad, se necesitan satisfacer las necesidades competitivas del mundo, una de estas herramientas son los sistemas de adquisición de datos, debido a que pueden descargar, almacenar y procesar información de componentes monitoreados o medidos. Con ellos podrás realizar muchos trabajos, dar instrucciones en tiempo real desde un ordenador personal. A cualquier proceso que necesita realizar o realiza al mismo tiempo diferentes operaciones. (González Coneo et al., 2012)

Con todos estos beneficios, los sistemas de recolección de datos ahorran dinero, tiempo y reducen errores sistemáticos. Otra ventaja de los sistemas que adquieren solo datos que deben configurarse con conexiones gráficas para simular



un dispositivo real que muestra el comportamiento de las variables medidas.
(González Coneo et al., 2012)

Actualmente, muchos sistemas de adquisición de datos (DAS) se utilizan para medir y supervisar parámetros físicos. En estas cantidades físicas podemos expresar la medida de temperatura, humedad relativa, expansión y otras, que son importantes en muchas actividades de investigación e industriales. Además, diferentes instrumentos tienen diferentes métodos de calibración para estas mediciones. (González Coneo et al., 2012)

2.2.16. Programas y complementos para el desarrollo

2.2.16.1. Matlab

MATLAB es un acrónimo de "Matrix Lab". El programa es para desarrollar cálculos con matrices y vectores, también se puede trabajar con números escalares, pueden ser complejas o reales en una cadena de caracteres. Para cálculos técnicos de alto rendimiento se utiliza el programa Matlab. También podemos crear funciones y programas especiales en el código de Matlab y se pueden agrupar en el Toolbox llamada librería, también se puede desarrollar ecuaciones diferenciales, funciones, algebra lineal, polinomios, gráficos y otros a parte del cálculo matricial. El programa de Matlab nos permite cargar y guardar archivos del ordenador, también permite la importación de data al espacio de trabajo previamente guardada. Para realizar los comentarios en la programación se usa el % a continuación se escribe en la línea, y no será leído por Matlab.
(Casado fernandez, n.d.)



2.2.16.2.Simulink

Simulink es un software para simular, analizar y modelar sistemas dinámicos que viene en forma de caja de herramientas con Matlab. La interfaz gráfica permite "ver" los patrones. También admite sistemas lineales y no lineales, sistemas continuos, discretos e híbridos. Simulink viene con muchos ejemplos para demostrarlo y facilitar su uso. La representación matemática de bloques se utiliza en métodos de control automático, se utiliza la variable compleja s , etc., la propiedad es la multiplicación por s que representa la resta y la división por s que representa la admisión. (Báez Matos et al., 2018)

2.2.16.3.Arduino IDE

La plataforma de Arduino es un software de desarrollo de código gratuito que ha sido desarrollado para la creación de ciertos proyectos y uso de sensores, actuadores y también sistemas informáticos. Esta desarrollado en un entorno de programación unificada que utiliza un microcontrolador que permite desarrollar código de programación en dicha placa. Es bastante usada en diferentes ares como la automatización, robótica, domótica y es muy interactivo. La plataforma de Arduino está diseñada para temas diferentes netamente educativos y proyectos de baja complejidad, ya que son muy interactivos y factible en enlazar sensores y actuadores directamente. Lo cual habilita una interacción como el control remoto, supervisión, almacenamiento de datos y automatización de diferentes procesos. Arduino emplea el lenguaje de programación C/C++ el IDE viene a ser una aplicación de código que fácilmente podemos



descargar desde la web ya que es un código abierto y gratuito, las funciones esenciales que tiene son escribir, cargar y depurar los códigos desarrollados en la placa IDE, para interactuar con el ordenador se usa en cable USB de forma física. Para la señal digital: una señal binaria tiene dos estados 0 y 1, lo que representa en Arduino como BAJO y ALTO. Tales señales se utilizan para activar o controlar diferentes dispositivos que necesiten la señal binaria como, por ejemplo: encender un led, activar un relé, etc. Para las señales analógicas: estas señales están en los valores de voltaje de 0 a 5 voltios su rango, también son utilizados para controlar dispositivos que necesiten de una señal variable para controlar ciertos actuadores como ejemplo tenemos, motores, intensidad de luces y otros. También maneja la comunicación como I2C, SPI. Normalmente, las entrada y salida del Arduino se usan netamente en señales digitales, mientras que las entrada y salida analógicas son adecuadas para analógicas. Es importante tener en cuenta que algunas placas Arduino tienen pines que pueden actuar como entradas y salidas, tanto digitales como analógicas. (Monk, 2012).



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1. Diseño de la investigación

Desde un enfoque cuantitativo experimental, para tener la viabilidad de reunir y registrar los datos numéricos obtenidos (Behar, 2008) el presente tesis recopiló los datos numéricos sobre las variaciones de temperatura del colector solar mediante una datalogger con sensor analógico, los datos obtenidos serán procesados para determinar automáticamente el control de la temperatura ambiente de la vivienda, para lograr el estudio de la presente investigación se miden las temperaturas del colector solar dentro y fuera del dispositivo.

Este enfoque permitirá analizar la utilidad del sistema en términos medibles de temperatura en grados centígrados (°C), determinando como los parámetros influyen en las variaciones del proceso de calefacción, Además, los datos serán usados para cotejar los resultados obtenidos en condiciones óptimas de calefacción, generando una base cuantitativa sólida para futuras mejoras en el prototipo implementado.

3.1.2. Nivel de la investigación

Sampieri Hernandez, (2016) busca identificar las características, rasgos de los individuos, grupos, comunidades, procesos, objetos u otros fenómenos bajo la investigación. El alcance de esta investigación será cuantitativo experimental, ya que indaga desarrollar un nuevo tema de investigación en beneficio de la sociedad e identificar sus características en el proceso analítico.



3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1. Población

Considerando conceptualmente infinito según (Sucasaire Pilco, 2021) al tener un grupo de mediciones aproximadamente enorme, el dispositivo recolecta o mide la temperatura en grados centígrados, en un determinado tiempo pueda ser cortas o largas, con la finalidad de llegar a realizar la adquisición de datos de temperatura para un control más efectivo.

El proyecto de tesis se puede realizar una infinidad de veces y estos experimentos se subyugan a diferentes temperaturas del ambiente según las estaciones, los mismos no se repiten dentro de un año por que se tiene estaciones cambiantes, lo que supone una población infinita conceptualmente se tiene una población de 5554 datos obtenidos de temperatura.

3.2.2. Muestra

De acuerdo con (Sampieri Hernandez, 2016) Para un proceso cuantitativo, una muestra es un subconjunto de una población seleccionada para participar en un estudio que debe caracterizarse para que los resultados puedan generalizarse a toda la población.

Una muestra es un parte de la población de la que se recogen datos, además debe ser representativa al total de la población, debe estar bien definida y predeterminada.

En este proyecto, el modelo se representa mediante datos de temperatura tomados del conjunto de colectores mediante un dispositivo electrónico similar al conjunto de dispositivos y equipos que componen el sistema de calefacción. La

implicación de que la población este considerada en infinita conceptualmente y estadísticamente la muestra será calculada con la fórmula de muestreo considerando poblaciones infinitas (Sucasaire Pilco, 2021).

Para este caso, se asumirá un nivel de confianza del 95% y un margen de error del 5%, utilizando la fórmula correspondiente para poblaciones finitas. Teniendo una población de 5545 datos, vamos a calcular el tamaño de la muestra con los valores más comunes:

$$n = \frac{N * Z^2 * p * q}{(N - 1) * E^2 + Z^2 * p * q} \quad (120)$$

- Población: $N = 5545$
- Nivel de confianza al 95%: $Z = 1.96$
- Margen de error al 5%: $E = 0.05$
- Proporción esperada: $p = 0.5$
- Proporción complementaria: $q = 0.5$

Reemplazamos en la formula:

$$n = \frac{5545 * 1.96^2 * 0.5 * 0.5}{(5545 - 1) * (0.05)^2 + (1.96)^2 * 0.5 * 0.5}$$

$$n = \frac{5545 * 3.8416 * 0.25}{(5545 * 0.0025) + (3.8416 * 0.25)}$$

$$n = \frac{5545 * 0.9604}{13.86 + 0.9604}$$

$$n = \frac{5326.42}{14.82} \approx 359.4$$

$n = 359$ es el tamaño de muestra optimo.



3.3. INSTRUMENTOS Y TECNICAS EN LA RECOLECCIÓN DE DATOS

3.3.1. Técnicas

Según Sampieri (2014) Medición significa "la asignación de valores como números, símbolos a las características de objetos de acuerdo con reglas".

Los métodos de recolección de datos son técnicas utilizados para obtener "información necesaria de estudio de investigación".

Estos métodos incluyen encuestas, entrevistas, observaciones y análisis de documentos, entre otros.

Para la obtención de datos se utilizó el método de observación, para implementación se evaluaron los hechos y situaciones investigadas, los datos fueron recolectados mediante un registrador de datos o datalooger, integrado al colector solar.

3.3.2. Instrumentos

Sampieri Hernandez, (2016) Un instrumento de medición apropiado es una herramienta o método empleado para recolectar datos de forma organizada y objetiva dentro de un proceso investigativo.

Estos instrumentos permiten cuantificar o cualificar, variables específicas, facilitando el análisis y la interpretación de los resultados.

Los instrumentos utilizados para la recolección de datos fue implementar una datalogger en un sistema embebido que está compuesto de un Arduino, memoria SD y sensor de temperatura LM35, los cuales fueron utilizados para la aducción de datos de temperatura de la celda colectora.

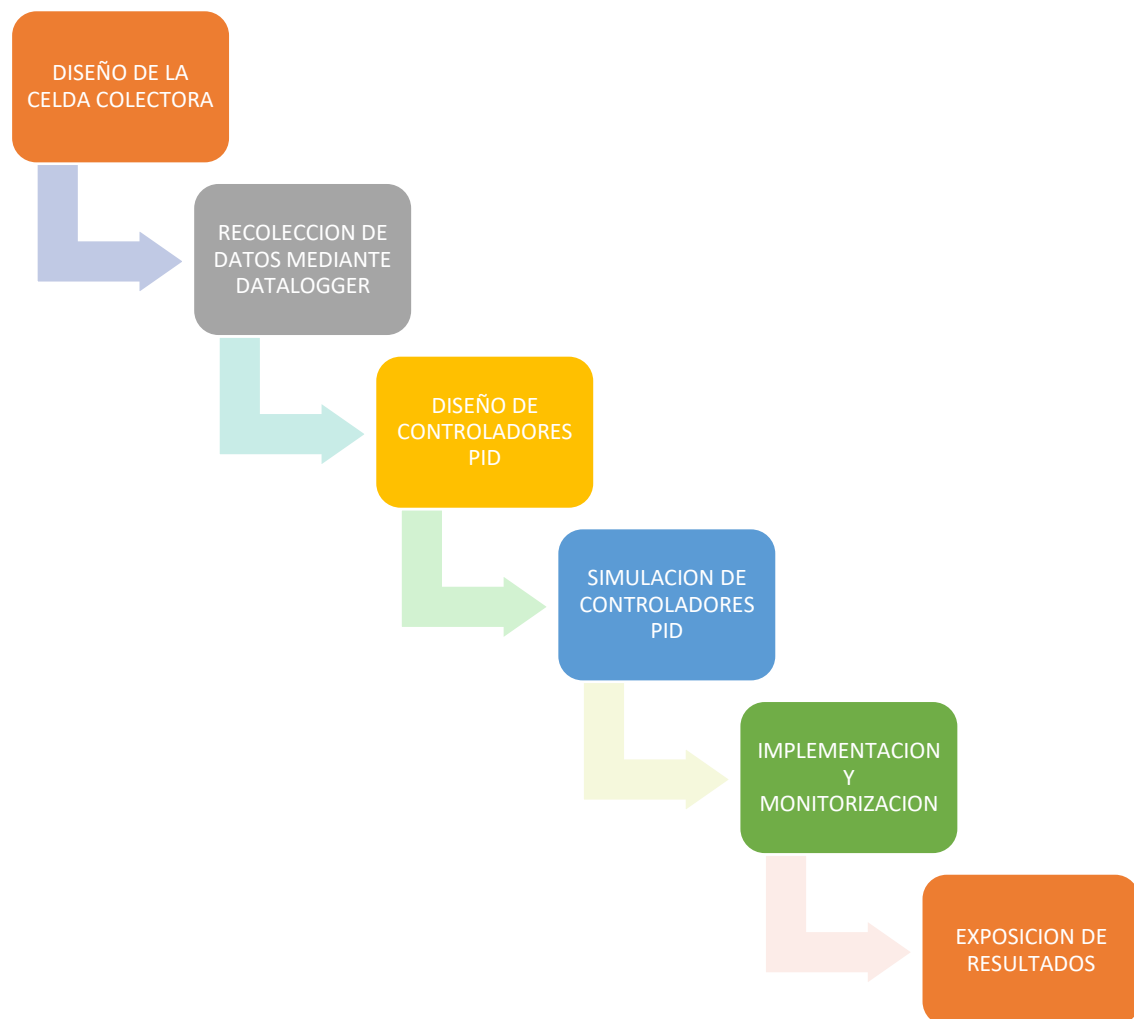
3.4. PROCEDIMIENTO DEL EXPERIMENTO

Según (Sampieri Hernandez, 2016) es la información que crea pasos detallados de procedimiento para recopilar datos para una determinación específica, es el proceso de recopilación de datos.

Se realiza un mapa semántico para reunir los datos de los procedimientos ver figura 37, para desarrollar el plan.

Figura 37

Mapa semántico del plan de procedimiento del experimento



Nota: Mapa semántico de los pasos a desarrollar.



3.5. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 4

Operacionalización de variables dependiente e independiente

Independiente: Temperatura del medio ambiente (Temperatura de entrada)	
Definición Conceptual	Cantidad de calor en el medio ambiente
Definición operacional	Cantidad de calor que ingresa al sistema de control PID
Dimensiones	Temperatura
Indicadores	Cantidad de calor
Escala de medición	Numérica cuantitativa continua
Nivel de rango	De 0 °C hasta 45°C
Dependiente: Temperatura del ambiente controlado (Temperatura de salida)	
Definición Conceptual	Cantidad de calor en el medio controlado
Definición operacional	Cantidad de calor que sale del sistema de control PID
Dimensiones	Temperatura
Indicadores	Cantidad de calor
Escala de medición	Numérica cuantitativa continua
Nivel de rango	De 0 °C hasta 100°C

Nota: Tabla de operacionalización de las variables.

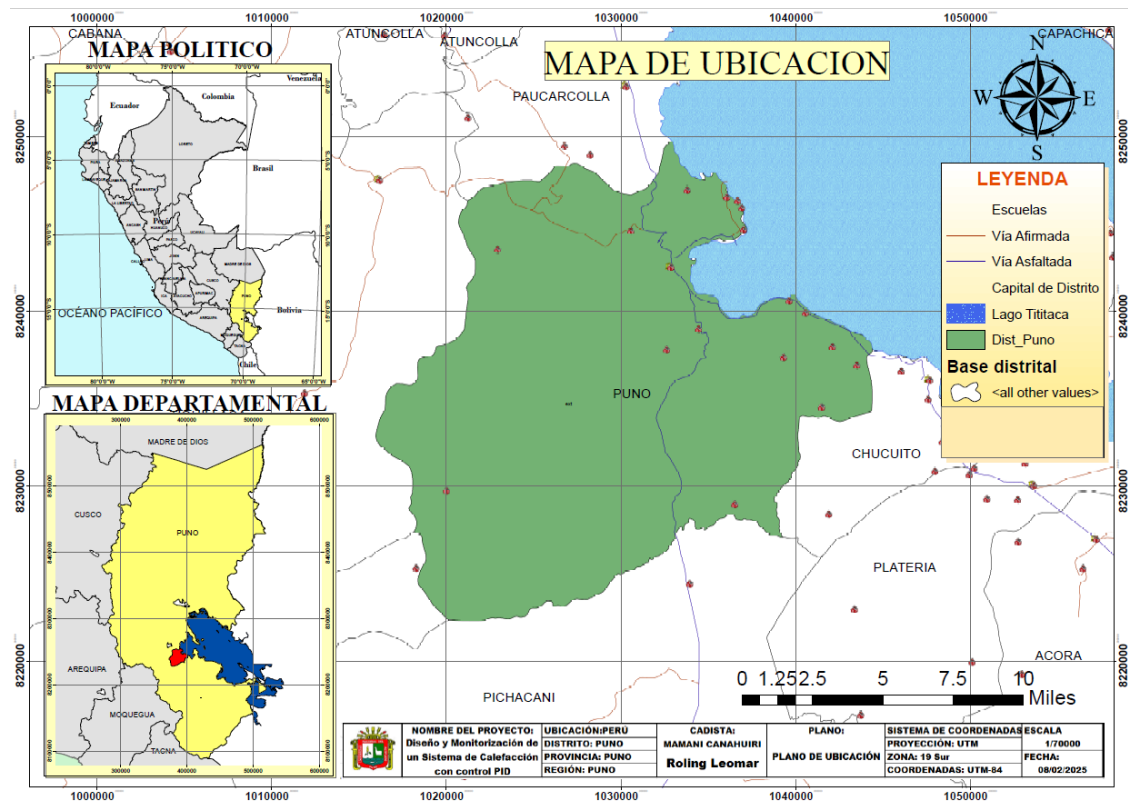
3.6. UBICACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto está destinado a ser ejecutado en el distrito de Puno, perteneciente a la provincia y departamento del mismo nombre.

- Latitud: 15°84'63" Sur.
- Longitud: 70°02'31" Oeste.
- Altitud: 3854 m. s. n. m.

Figura 38

Ubicación del proyecto en el distrito de Puno



Nota: Mapa de ubicación, adaptado en ArcGIS.

3.7. DISEÑO DEL COLECTOR SOLAR MODULAR TÉRMICO

Se observa el diseño del módulo colector solar que consta de tres placas planas colectoras que están unidas unas con otras, también se observa en la parte inferior izquierda un ventilador.

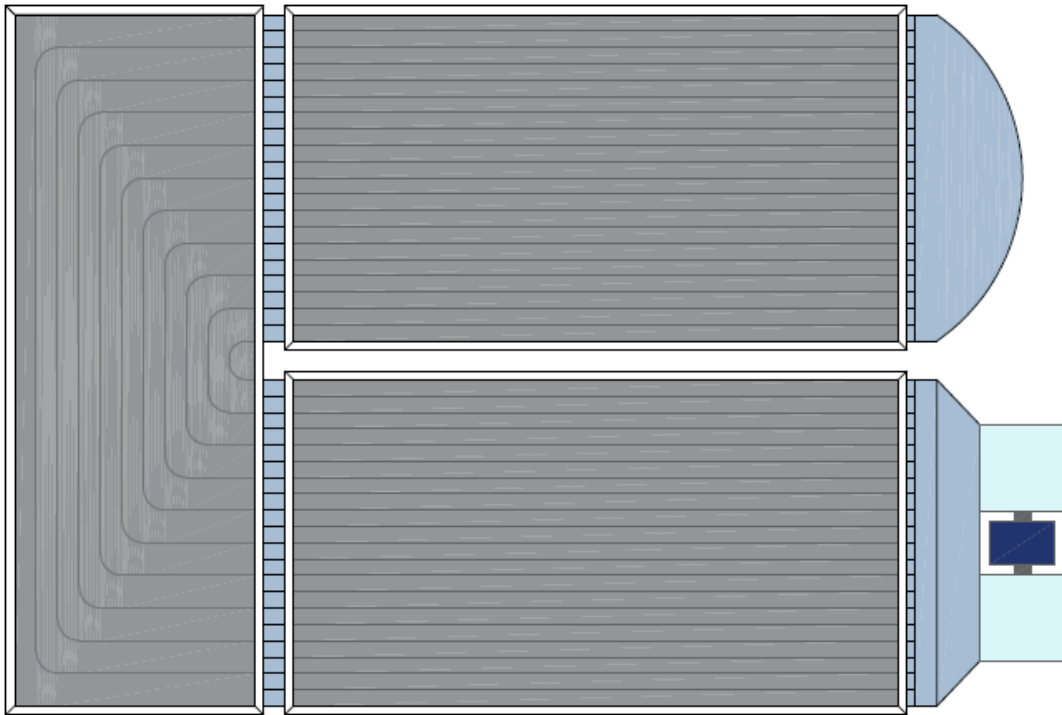
También a su vez cuenta con ventilador que generaran flujo de aire dentro de las placas colectoras, en la parte superior izquierda se observa la salida del flujo de aire caliente.

Este flujo ira a la vivienda para calefactar la habitación donde se instalará, su funcionalidad es captar el aire caliente mediante las placas planas con la radiación solar,

luego mediante el ventilador generar flujo de aire el cual circulara según sea requerida para el confort térmico de la vivienda o habitación que se observa en la figura 39.

Figura 39

Módulo de colector solar plano



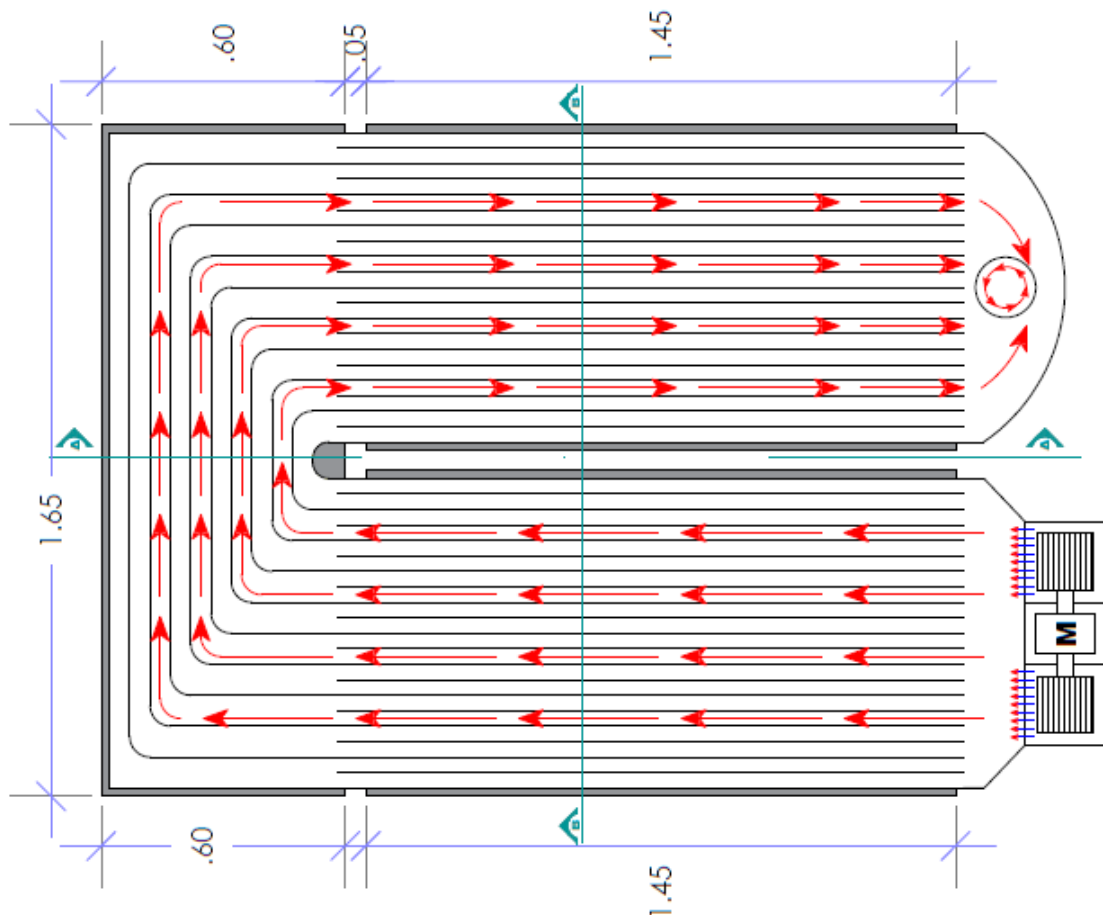
Nota: Se observa el colector modular de energía térmica solar.

Para ello se realiza el control PID, utilizando tres métodos de control, también se monitorizará y tomaran datos de temperatura que fluctúan durante el día, así también se podrá almacenar los datos obtenidos mediante la monitorización.

Se observa las medidas del diseño de prototipo del módulo colector solar plano, también el flujo de aire que circula por los ductos de las celdas que están instaladas dentro de las placas planas, como se observa en la figura 40, a su vez podemos visualizar el ingreso de flujo de aire aplicado mediante un dispositivo, que vendría a ser la ventiladora con un motor eléctrico, como se aprecia en la imagen.

Figura 40

Diseño y medidas del módulo de colector solar plano (corte de planta)



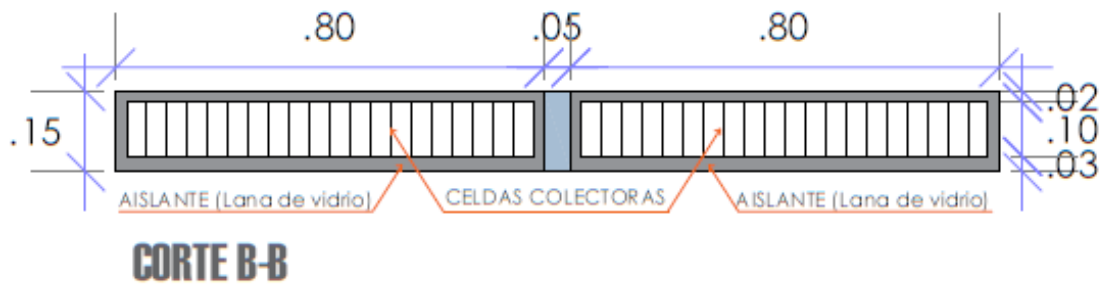
Nota: Podemos visualizar la circulación del flujo de aire que entra mediante las ventiladoras.

El flujo de aire será controlado mediante las revoluciones del ventilador, esto será controlado mediante el sensor de temperatura que está instalada dentro de la habitación a calefactar.

En la figura 41 observa corte de las celdas colectoras, la conformación y medidas que tiene las celdas como altura, ancho y distancias de placas por donde circulara el flujo de aire caliente que se genere dentro de las celdas este dispositivo implementado puede ser aplicado a diferentes situaciones de climatización ya que son fáciles de implementar.

Figura 41

Corte B-B del colector solar plano

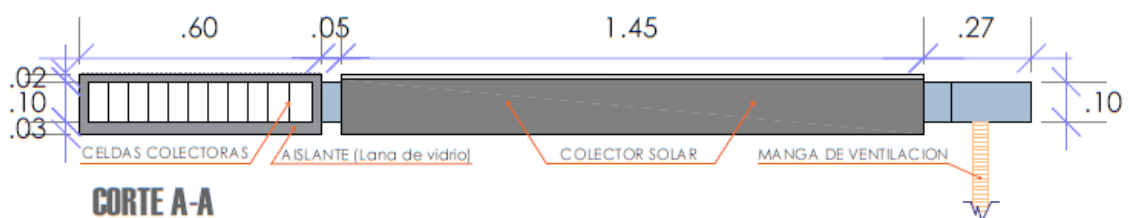


Nota: En el corte se aprecia las celdas que con la radiación del sol generan aire caliente en el interior de la placa plana.

Podemos apreciar el corte A-A de la figura 42, se observa las medidas empleadas en la construcción de cada una de las placas planas a detalle, también se observa la conformación de los materiales utilizados en la construcción del colector solar plano. También la forma de la instalación y posición en las que se debe realizar el montaje de las piezas o partes que conforma.

Figura 42

Corte A-A del colector solar plano

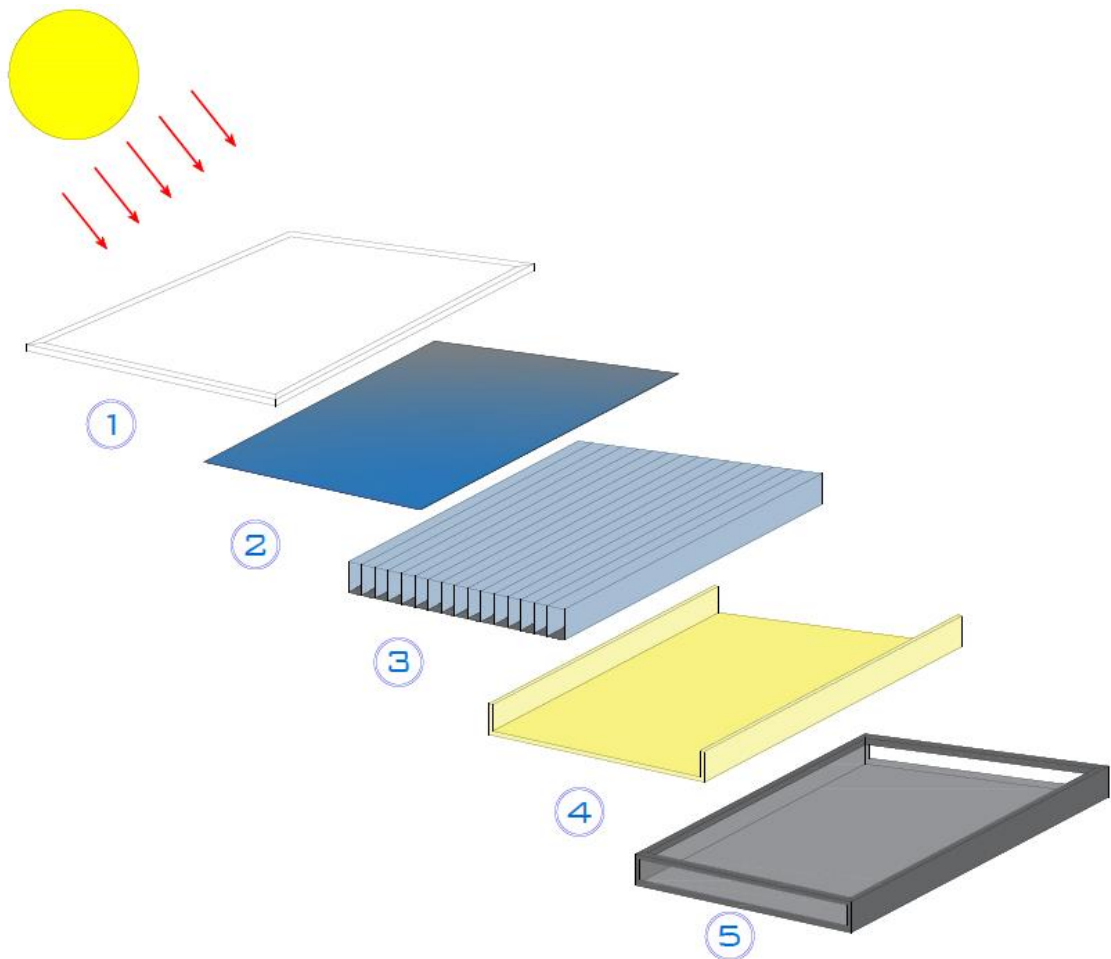


Nota: En corte A-A se observa las partes generales de la celda colectora plana.

La figura 43 muestra el despliegue de la celda colectora de placa plana de la forma como está constituida para un ensamble y sus diferentes partes como se observa, a continuación, se detalla los componentes que conforman una placa plana.

Figura 43

Despliegue de las partes del módulo colector solar plano



Nota: Despliegue de las partes que conforma una celda colectoras de placa plana fojas abajo se describe.

- 1) Marco de aluminio (soporte de vidrio).
- 2) Cubierta transparente de vidrio de 40 mm (vidrio claro).
- 3) Celdas colectoras de alimentación de aire.
- 4) Aislante térmico (lana de fibra de vidrio).
- 5) Caja del colector solar plana (0.40 mm aluminio galvanizado).

Podemos ver en la figura 44, la implementación prototipo del módulo colector solar plano, que cuenta con tres placas planas que están unidas, en el interior de cada placa plana se capta energía calorífica, el cual se transforma en calor o aire caliente, la cual mediante mecanismos de transferencia de calor mediante la incidencia del sol hacia

el vidrio crea la conducción, convección y radiación solar, también la radiación del sol se puede apreciar en presencia y ausencia de materia.

Figura 44

Prototipo del módulo diseñado de colector solar plano



Nota: Se muestra el módulo implementado para realizar la climatización de viviendas.

3.8. ANÁLISIS DEL DESARROLLO

Para el procedimiento del experimento es necesario tomar datos de temperatura de la planta a controlar, para la obtención se realiza una datalogger, donde se toma datos de temperatura de la planta para el estudio con los datos tomados, Para llevarlo a cabo, se expone el análisis matemático de los datos recopilados.

Para realizar el diseño de PID se utiliza el software Matlab, programa que permite modelar la FT de la planta, los datos recogidos mediante datalogger, que está implementada en Arduino, también permite visualizar la gráfica del comportamiento de la temperatura. Para realizar simulaciones matemáticas se utilizó el programa Matlab y se aprovechó la capacidad de mostrar gráficos de cambios de temperatura para realizar cálculos matemáticos.

3.8.1. Obtención de datos de temperatura del colector solar modular

Para obtener los datos de temperatura se construye un datalogger en Arduino utilizando un sensor de temperatura LM35 y se utiliza una ranura para tarjetas microSD para su almacenamiento, lo que permite el control de programas de forma muy dinámica y sencilla. Es fácil de conectar a la placa Arduino como dispositivo periférico. Puede leer y escribir en la tarjeta micro SD mediante códigos de programación y guardar datos en la memoria micro SD.

3.8.2. Desarrollo para obtener la función de transferencia de la planta

Para el desarrollo de un modelo matemático primeramente se debe tener datos de una magnitud a controlar de la planta, el mecanismo de transferencia de la planta es la temperatura o energía térmica.

La energía transformada sería aire caliente que se obtiene en la salida del módulo de colector solar. Los colectores emplean diversos mecanismos para transferir calor, entre los cuales se encuentran la conducción, la convección y la radiación solar.

La que transporta energía calorífica es la radiación, el proceso que realiza esta determinado en un rango de frecuencia de onda electromagnética térmica. El



cuerpo puede absorberla o reflejarla en todas direcciones la emisión. La energía a absorber es la radiación solar directa como difusa, su comportamiento depende de las características climatológicas, geográficas y ángulo de incidencia hacia el colector solar durante el día.

Para obtener función de transferencia se utilizó el software Matlab, que realiza modelar matemáticamente la función de transferencia de la planta.

De los datos tomados, mediante datalogger, tanto de variables de entrada y variable de salida, con ello se desarrollará o pasará al programa o software, donde definiremos las muestras tomadas en un tiempo de un segundo.

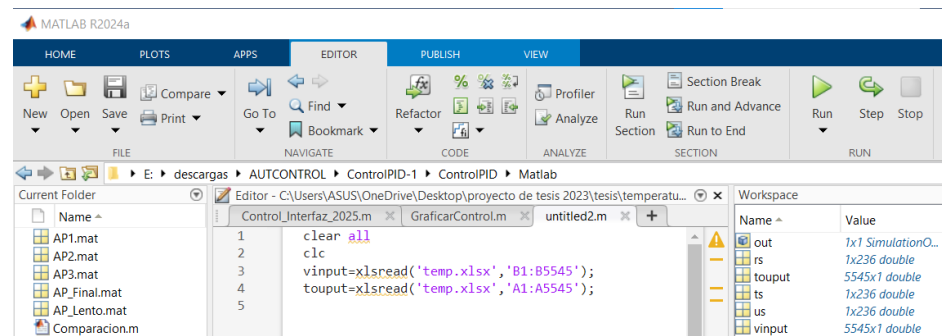
3.8.2.1. Modelo matemático de la planta en Matlab

Con el fin de obtener la función de transferencia o el modelo matemático, se utilizan los datos de entrada correspondientes al voltaje suministrado, el cual representa una señal escalón unitario, y los datos de salida de la planta, que corresponden a la temperatura registrada en un tiempo determinado.

Para este propósito, se realiza el procedimiento respectivo en Matlab. En la figura 45, se observa como importar los datos de Excel hacia el programa Matlab, que se ha obtenido mediante el datalogger en Arduino, (vinput) es el voltaje de entrada, (toupout) es la temperatura de salida de la planta, también la cantidad de datos tomados de temperatura que se tomaron dentro de 12 horas, que vendrían a ser 5545.

Figura 45

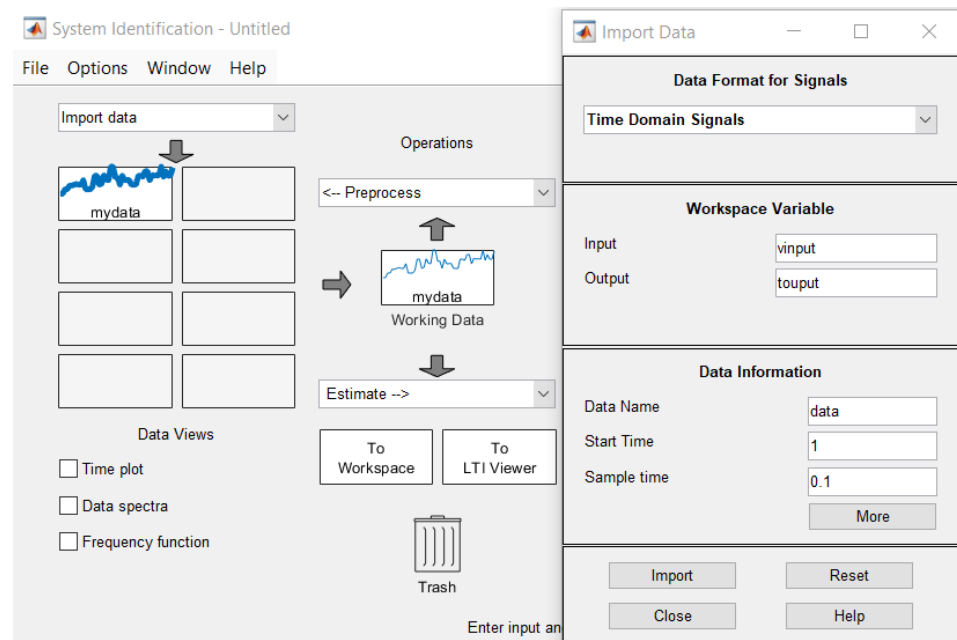
Datos importados de Excel hacia Matlab



Nota: La figura muestra los datos de temperatura importados desde Excel hacia Matlab.

Figura 46

Importar data en System Identification



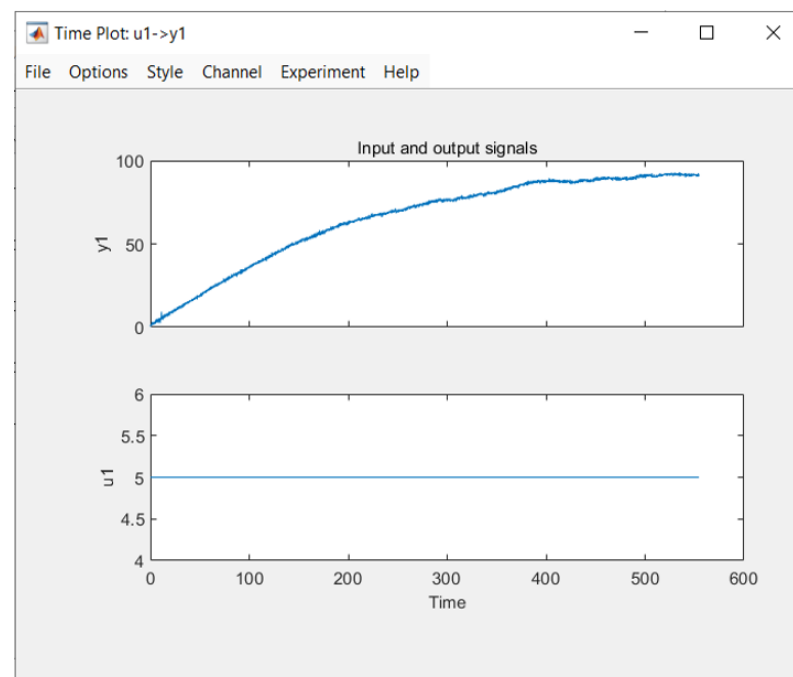
Nota: En el Workspace se le asigna nombre a la variable de entrada y salida y un tiempo de muestreo.

Con estos datos se determinará la función de transferencia de la planta. Para ello, se debe acceder a la ventana de comandos (Command Window) e ingresar el comando `systemIdentification`. Una vez abierta la interfaz correspondiente, se procederá a importar los datos en el dominio del tiempo, que mostrará una nueva pestaña donde se coloca los valores de

entrada, salida y el tiempo de muestreo o datos tomados en segundos, como se muestra en la figura 46, hacer clic en importar y se mostrará en el cuadro con el nombre de (data). En tiempo de muestra (Sample time), se coloca un valor de 0.1, porque al realizar la toma de datos en la datalogger se empleó un tiempo de muestreo de un segundo, la figura 47 muestra el gráfico de la curva tiempo de los datos tomados de la celda colectora en el programa de Matlab.

Figura 47

Gráfico obtenido de los datos exportados en Matlab.



Nota: Se tiene el gráfico de la temperatura máxima alcanzada del colector solar.

A continuación, se realizó la estimación de modelo matemático, donde se asigna el número de polos y ceros, también muestra el modelo de la función de transferencia, ya seleccionado para este caso, con un polo y cero ceros, se realiza la estimación, como se muestra en le figura 48.

Figura 48

Estimación del modelo de la planta

Par	Known	Value	Initial Guess	Bounds
K	<input type="checkbox"/>		Auto	[-Inf Inf]
Tp1	<input type="checkbox"/>		Auto	[0 Inf]
Tp2	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]
Tp3	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]
Tz	<input type="checkbox"/>	0	0	[-Inf Inf]
Td	<input type="checkbox"/>		Auto	[0 3]

Nota: Se selecciona el modelo presentado para llevar a cabo la estimación de la función de transferencia de la planta.

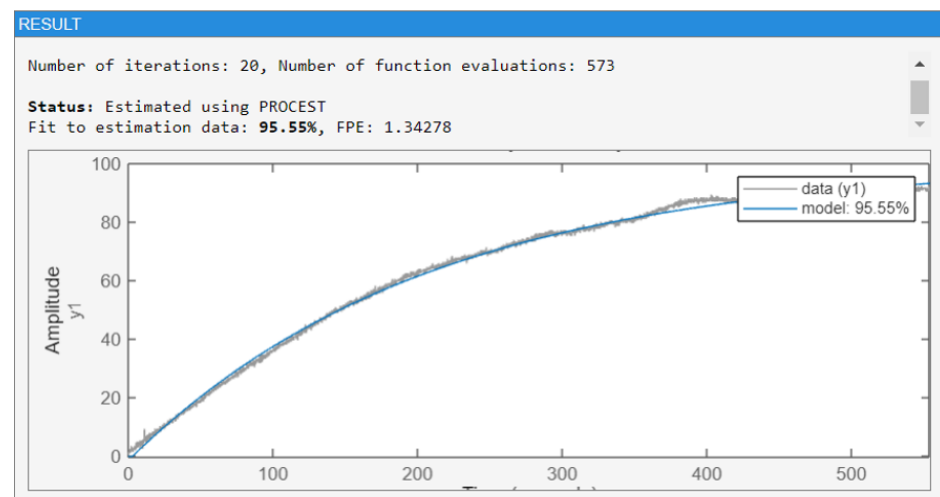
En la estimación también se consideró un tiempo de retardo, el modelo matemático se seleccionó según la estimación que pueda asemejarse más al gráfico de la temperatura del colector solar de los datos tomados de la curva de temperatura.

La identificación del modelo de proceso, se debe verificar la exactitud mayor al 75%, para este caso se realizó varias estimaciones con diferente polos y ceros, y los resultados que mostraron no fueron la estimación acertada, de las estimaciones obtenidas, el que se acerca más a un 100% fue de 1 polo y 0 ceros.

Con esta estimación se trabaja para el cálculo del control PID, para así obtener la ganancia proporcional, integral y derivativo del controlador. La figura 49 muestra el resultado de la estimación realizada a partir de los datos registrados por el datalogger en la celda colectora, donde muestra un 95.55% de similitud, el cual indica que la función de transferencia es el modelo matemático adecuado que representa a la celda colectora modular para este proceso de control.

Figura 49

Resultado de la estimación del grafico al 95.55%

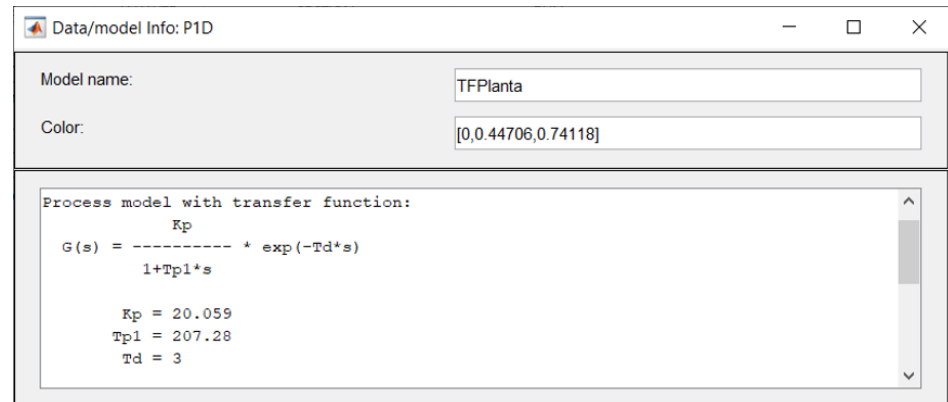


Nota: Dado que la estimación supera el 90%, el margen de error será reducido al calcular la función de transferencia.

Se visualiza la función de transferencia en la herramienta System Identification de Matlab bajo el nombre de FTplanta. Asimismo, se puede apreciar el Data/Model correspondiente a la planta estimada, tal como se muestra en la figura 50, junto con el modelo de la función de transferencia derivado de los datos de temperatura registrados en la celda colectora.

Figura 50

Data/Model estimado para la planta



Nota: La función de transferencia, ganancia proporcional y tiempo de retardo.

La figura 51 muestra la función de transferencia resultante de la celda colectora modular, que tiene un retardo de 3 segundos y una ganancia de 20.06 que se obtuvo mediante la estimación en software de Matlab.

Figura 51

Función de transferencia de la planta.



Nota: Se presenta la obtención de la función de transferencia de la planta en el Command Window.

3.8.3. Desarrollo para la obtención del controlador PID

Contando con la función de transferencia de la planta, representada en la figura 51, se procede a realizar la sintonización del controlador PID. Para ello, se aplica el primer método propuesto por Ziegler-Nichols. Este método requiere que

el lazo de control esté en condición abierta, donde la acción del controlador consiste en aplicar una señal de escalón unitario, con el fin de generar una respuesta escalonada en la salida del controlador PID. Normalmente, una planta recibe una entrada de tipo escalonado en su entrada y la respuesta de salida se obtiene a partir de los parámetros PID y se tiene la reacción de la curva de respuesta o respuesta transitoria. Es necesario que la respuesta del sistema tenga forma sigmoidea, esto quiere decir que no debe tener sobre impulsos, la dinámica integradora que crezca exponencialmente con el tiempo. La señal sigmoidea define dos parámetros de retardo en el tiempo L , dado que la constante de tiempo es τ , e se trata de un sistema de primer orden con retardo, cuya función de transferencia se expresa como:

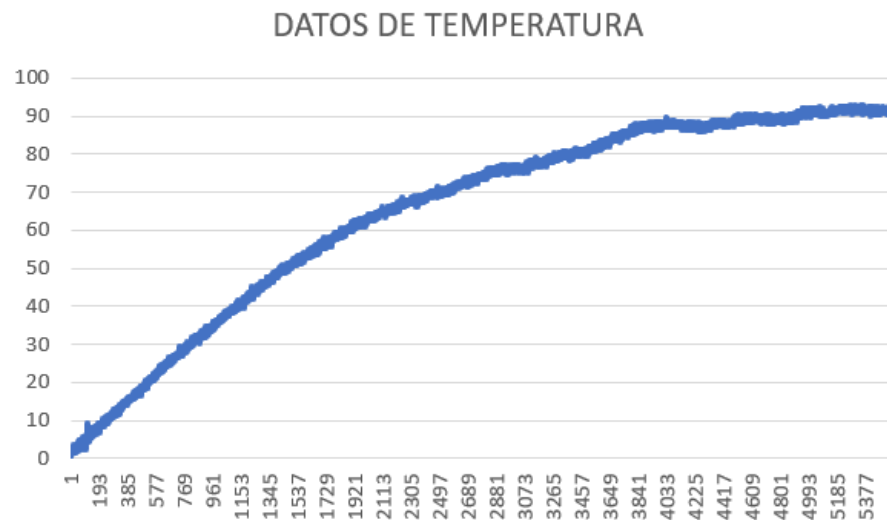
$$G_p(s) = \frac{C(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-Ls}}{\tau s + 1} \quad (121)$$

3.8.3.1. Control de sintonía de Ziegler-Nichols primer método

La sintonía fue diseñada para controladores analógicos, no digitales. Por lo tanto, si el sistema tiene un tiempo de muestreo grande (T_s) los modelos vistos anteriormente pueden lograr una reducción de más del 25% en la incertidumbre. Otra es aumentar el retraso a un valor igual a la mitad del tiempo de muestra $L' = L + T_s/2$ antes de usar los valores de la tabla. Optimizaremos el sistema utilizando métodos de corrección PID y Ziegler-Nichols. Tenemos un sistema cuyo modelo matemático es desconocido, pero que presenta la siguiente forma sigmoidea como se observa en la figura 52 tomado los datos del colector solar modular.

Figura 52

Curva de la temperatura de la celda colectora



Nota: Los datos tomados de temperatura mediante la datalogger de la celda colectora.

A través del uso del software Matlab, se determinó la función de transferencia de la planta operando en lazo abierto.

A partir del modelado realizado con los datos de temperatura del colector solar modular, se obtuvo una ecuación de primer orden.

$$G_p(s) = \frac{20.06e^{-3s}}{207.3s + 1} \quad (122)$$

El factor de controlabilidad se obtiene de la siguiente:

$$\frac{L}{\tau} = \frac{3}{207.3} = 0.0145 \quad (123)$$

Para el desarrollo aplicaremos las ecuaciones de la tabla del Método 1 de Ziegler Nichols que está representada en la tabla 1, y obtenemos las siguientes constantes o parámetros para la sintonización del controlador:

$$K_p = 1.2 \frac{\tau}{KL} \quad (124)$$

$$K_p = 1.2 \frac{207.3}{(20.06)(3)}$$

$$K_p = 4.134$$

$$\tau_i = 2L \quad (125)$$

$$\tau_i = (2)(3) = 6$$

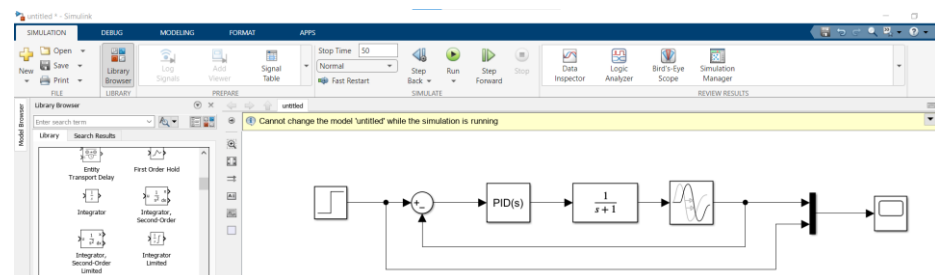
$$\tau_i = 2L \quad (126)$$

$$\tau_d = (0.5)(3) = 0.2$$

Con los valores obtenidos se realizará la simulación de control PID en el software de Simulink de Matlab. Como se muestra en la figura 53.

Figura 53

Simulación del control PID en software Simulink

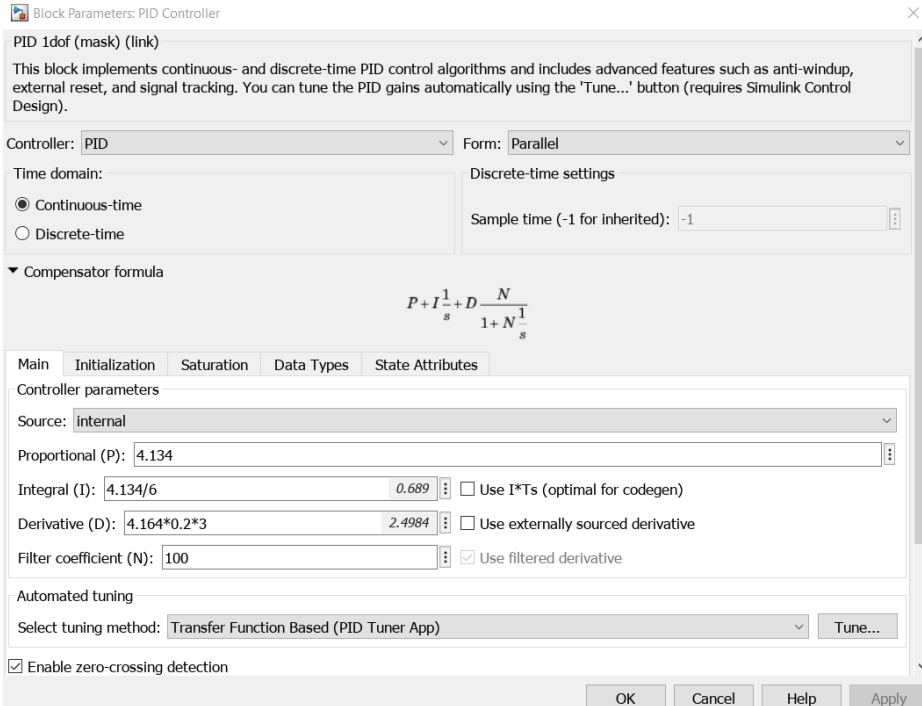


Nota: Implementación del diagrama de bloques en simulink.

Para la simulación del controlador PID se realiza en simulink del programa de Matlab, se ingresan los valores obtenidos en el bloque PID(s) donde se despliega el bloque de parámetros como se muestra en la figura 54 donde se ingresan los valores calculados de ganancia proporcional, integral y derivativo.

Figura 54

Parametrización de los valores obtenidos en el controlador PID



Block Parameters: PID Controller

PID 1dof (mask) (link)

This block implements continuous- and discrete-time PID control algorithms and includes advanced features such as anti-windup, external reset, and signal tracking. You can tune the PID gains automatically using the 'Tune...' button (requires Simulink Control Design).

Controller: PID Form: Parallel

Time domain:
 Continuous-time
 Discrete-time

Discrete-time settings
Sample time (-1 for inherited): -1

Compensator formula

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

Main Initialization Saturation Data Types State Attributes

Controller parameters

Source: internal

Proportional (P): 4.134

Integral (I): 4.134/6 0.689 Use I*Ts (optimal for codegen)

Derivative (D): 4.164*0.2*3 2.4984 Use externally sourced derivative

Filter coefficient (N): 100 Use filtered derivative

Automated tuning

Select tuning method: Transfer Function Based (PID Tuner App) Tune...

Enable zero-crossing detection

OK Cancel Help Apply

Nota: Ingreso de las ganancias obtenidas del controlador PID en bloque de parámetros.

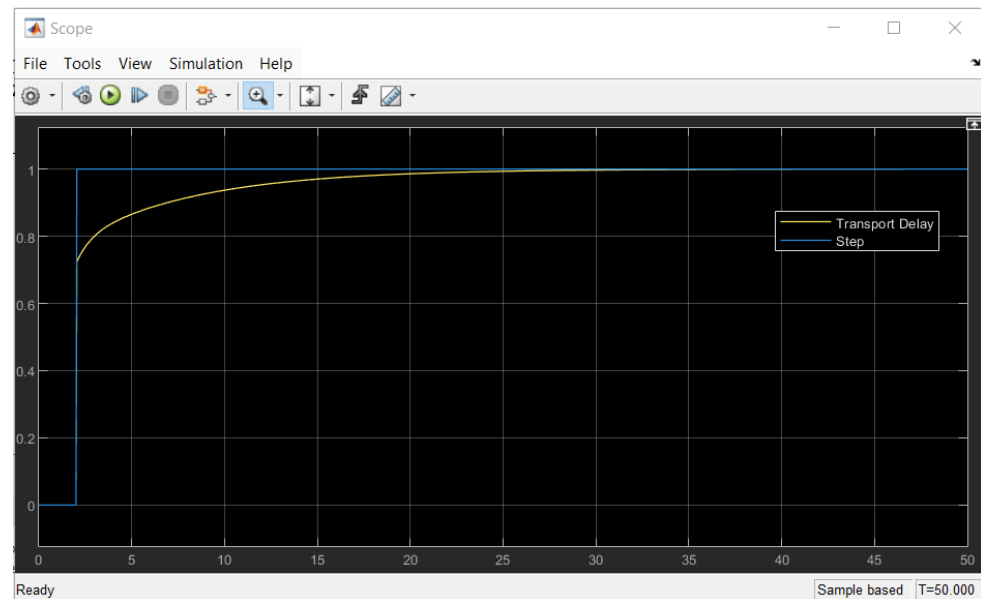
En la figura 55, muestra la respuesta transitoria de control PID de la planta simulado mediante la estimación desarrollada en Matlab.

La estabilización lo realiza en 45 segundos, es set-point viene a ser un escalón unitario que se muestra en la imagen que es de color azul, y la curva sigmoidea de color amarillo es la respuesta al escalón unitario.

Para esta simulación, donde se puede apreciar la respuesta con control PID de la planta en términos de simulación ideales, de la respuesta transitoria al aplicarle una entrada unitaria, se aprecia el tiempo de estabilización de la planta, con los datos obtenidos.

Figura 55

Curva de reacción del modelo de control PID



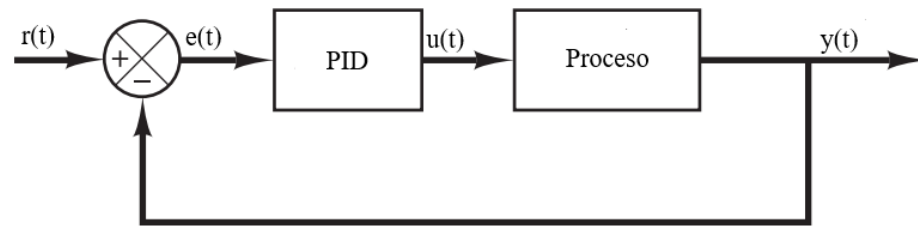
Nota: Respuesta transitoria de la planta, empleando un escalón unitario.

3.8.3.2. Control de sintonía de Ziegler-Nichols segundo método

Para la optimización Ziegler-Nichols en lazo abierto y lazo cerrado se utilizan controladores como el PID. En el modo de lazo abierto, el set-point del controlador debe establecerse de forma manual para generar una respuesta escalonada en la salida del propio controlador PID, lo que implica que la planta recibe una señal de entrada. En el segundo método, que corresponde al lazo cerrado, se deben anular las acciones integradora y derivativa, y luego ajustar progresivamente la ganancia proporcional del controlador hasta que la salida del sistema muestre una oscilación de amplitud constante en la variable medida por los sensores. La figura 56 presenta un diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado, donde se representa la interacción entre el controlador y la planta, con una entrada $r(t)$ y una salida $y(t)$.

Figura 56

Esquema de lazo cerrado



Nota: Diagrama de bloque para la sintonía de Ziegler-Nichols en lazo cerrado.

El bloque PID toma como entrada la señal de error $e(t)$ y genera como salida la señal de control $u(t)$, la cual se determina mediante la siguiente ecuación.

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt + \tau_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (127)$$

En el software de Simulink la ecuación PID del controlador es de la forma para realizar el siguiente arreglo, para sintonizar los parámetros de la ganancia proporcional, integral y derivativo.

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (128)$$

$$P = K_p; \quad I = \frac{K_p}{\tau_i}; \quad D = K_p \tau_d \quad (129)$$

Este método se utiliza cuando un sistema no cuenta con su modelo matemático que es aplicado a sistemas de lazo cerrado y abierto, también como una parametrización de los sistemas de control, por ello se selecciona el modelo de función de transferencia deseada para la estimación con los datos obtenidos de la celda colectora.

Ahora se realiza la estimación del modelo de proceso para la planta con 3 polos y 0 ceros, sin retardo, como se aprecia en la figura 57.

Figura 57

Estimación del modelo de proceso con tres polos

The screenshot shows the 'Process Models' window. On the left, the 'Transfer Function' is displayed as
$$\frac{K}{(1+Tp1 s)(1+Tp2 s)(1+Tp3 s)}$$
. Below it, the 'Poles' are set to 3, and the 'All real' checkbox is checked. On the right, a table lists parameters for estimation:

Par	Known	Value	Initial Guess	Bounds
K	<input type="checkbox"/>		Auto	[-Inf Inf]
Tp1	<input type="checkbox"/>		Auto	[0 Inf]
Tp2	<input type="checkbox"/>		Auto	[0 Inf]
Tp3	<input type="checkbox"/>		Auto	[0 Inf]
Tz	<input type="checkbox"/>	0	0	[-Inf Inf]
Td	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 3]

Below the table, the 'Initial Guess' section has 'Auto-selected' selected, with 'From existing model' and 'User-defined' options also present.

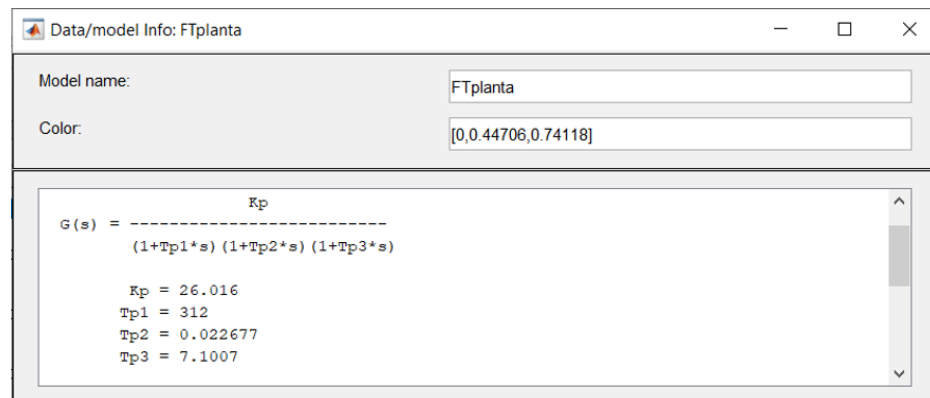
Nota: Se estima la FT. Para la planta con tres polos y cero ceros, para el método de Zigler Nichols.

En la figura 58 se muestra la función de transferencia de la planta, la cual presenta tres polos y ningún cero. Además, su estimación en el dominio del tiempo supera el 90%, considerando una única entrada, una salida y un total de 5545 muestras.

Este resultado se obtiene mediante en software de Matlab, para ello se utiliza los datos tomados de temperatura de la planta o colector solar modular del valor mínimo hacia el valor máximo que se obtuvo que pueda generar el colector solar dentro de un día.

Figura 58

Resultado del modelo de estimación de la planta

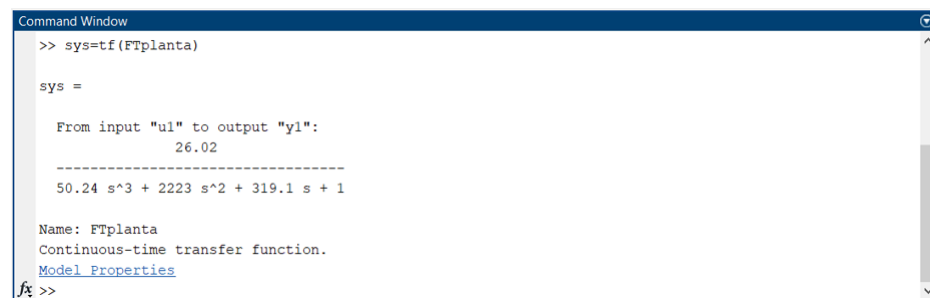


Nota: Función de transferencia de la planta con tres polos y cero ceros.

La figura 59 presenta el resultado obtenido al estimar la función de transferencia en la ventana de comandos (Command Window) para la celda colectora modular. A partir de este resultado, se procederá a aplicar el segundo método de Ziegler-Nichols.

Figura 59

Función de transferencia para desarrollo de método Ziegler-Nichols



Nota: La función de transferencia con la que se trabajó para desarrollar el método de Ziegler-Nichols.

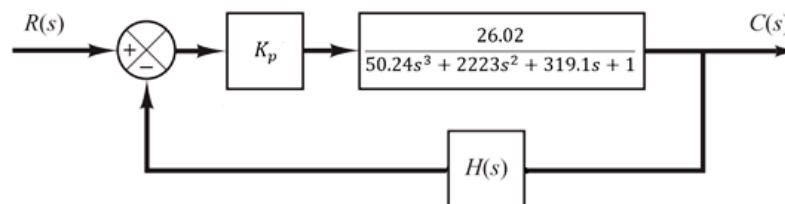
Se desarrollo el modelo matemático utilizando el método 2 de Ziegler-Nichols para obtener resultados de las ganancia proporcional, integral y derivativo del controlador, Dado que se conoce la función de transferencia del sistema, esta se representa mediante la siguiente ecuación, la cual corresponde a la función de transferencia de la planta.

$$G_p(s) = \frac{26.02}{50.24s^3 + 2223s^2 + 319.1s + 1}$$

Se aprecia en figura 60, el diagrama de bloque del sistema de control a implementar, donde tenemos la FT de la planta. Primeramente, se desarrolló en lazo abierto el sistema de control como lo muestra.

Figura 60

Bloque de control proporcional



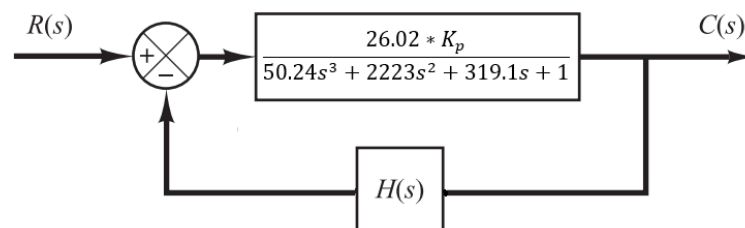
Nota: La ecuación de función de transferencia de la planta en lazo cerrado.

$$G(s) = \frac{26.02 * K_p}{50.24s^3 + 2223s^2 + 319.1s + 1}$$

La función de transferencia del sistema en lazo cerrado se determina mediante operaciones matemáticas, representadas en el diagrama de bloques, simplificando el sistema a un único bloque con retroalimentación $H(s)$, que representa el sensor o una unidad unitaria, tal como se ilustra en la figura 61.

Figura 61

Bloque en lazo cerrado con realimentación



Nota: Bloque de lazo cerrado, integrado con ganancia proporcional.

Se desarrolla la FT en lazo cerrado del diagrama de bloques.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (130)$$

Reemplazamos valores obtenidos.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\frac{26.02K_p}{50.24s^3 + 2223s^2 + 319.1s + 1}}{1 + \left(\frac{26.02K_p}{50.24s^3 + 2223s^2 + 319.1s + 1} \right)} \quad (1)$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\frac{26.02K_p}{50.24s^3 + 2223s^2 + 319.1s + 1}}{\frac{50.24s^3 + 2223s^2 + 319.1s + 1 + 26.02K_p}{50.24s^3 + 2223s^2 + 319.1s + 1}}$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{26.02K_p}{50.24s^3 + 2223s^2 + 319.1s + 27.02K_p}$$

Teniendo la ecuación característica simplificada de la FT, se aplicó el criterio de estabilidad de Routh Hurwitz, al denominador de la ecuación característica resultante que viene a ser un polinomio de tercer grado y expresado de la siguiente forma.

Ecuación característica del sistema en Lazo Cerrado.

$$50.24s^3 + 2223s^2 + 319.1s + 27.02K_p = 0$$

El criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz permite verificar si existen raíces inestables en una ecuación polinómica de tercer grado. Este procedimiento se aplica únicamente a polinomios con un número finito de términos. En el análisis de sistemas de control, la estabilidad del sistema puede determinarse directamente a partir de los coeficientes de la ecuación característica derivada del sistema en lazo cerrado. Se debe de ordenar los



coeficientes de polinomio en columnas y filas de acuerdo al criterio de Routh Hurwitz, se deben de colocar todos los elementos del polinomio como se aprecia fojas abajo.

S^3	50.24	319.1
S^2	2223	$27.02K_p$
S^1	a_1	a_2
S	b_1	b_2

Para hallar los valores de a_1 y a_2 , se evalúan del nodo siguiente:

$$a_1 = \frac{(2223)(319.1) - (50.20)(27.02K_p)}{2223}$$

$$a_1 = \frac{709359.3 - 1357.5K_p}{2223}$$

$$a_2 = 0$$

Para hallar los valores de b_1 y b_2 .

$$b_1 = \frac{a_1(27.02K_p) - 2223(0)}{a_1}$$

$$b_1 = \frac{a_1(27.02K_p)}{a_1}$$

$$b_1 = 27.02K_p$$

$$b_2 = 0$$



Ya teniendo los valores de a_1 y a_2 ; b_1 y b_2 , se observa que la estabilidad de Routh Hurwitz, la primera columna los valores obtenidos son positivos, por ello el sistema viene a ser estable.

Se calcula la ganancia limite, ganancia ultima o ganancia critica K_p critico o K_u , para obtener las oscilaciones sostenidas, realizando las siguientes ecuaciones se tiene:

$$\frac{709359.3 - 1357.5K_p}{2223} > 0$$

$$709359.3 - 1357.5K_p > 0$$

$$(-1) - 1357.5K_p > -709359.3(-1)$$

$$K_p < \frac{709359.3}{1357.5}$$

$$K_p < 522.55$$

$$0 < K_p < 522.55$$

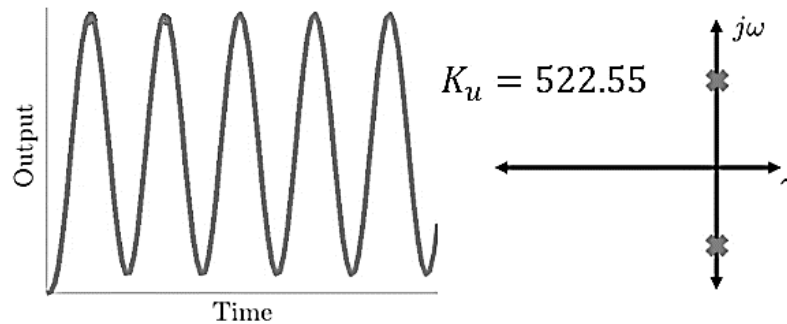
$$K_{Pcritico} = K_u = 522.55$$

Cuando el sistema llega a su ganancia crítica, significa que ha alcanzado el umbral de oscilación.

Si se supera este valor, el sistema se vuelve inestable, en la figura 62 se observa dos polos complejos conjugados que están ubicado en el eje imaginario del plano complejo s esto indica que al aumentar o incrementar la ganancia proporcional K_p puede causar la inestabilidad del sistema. Por ello vendrá a ser nuestra ganancia critica $K_{Pcritica}$

Figura 62

Oscilación del sistema con la $K_{Pcritico}$ y los polos en el eje imaginario.



Nota: Oscilaciones sostenidas para hallar la ganancia crítica en el plano complejo s .

Se calcula el periodo crítico P_u , del criterio de estabilidad de Routh Hurwitz el polinomio perteneciente a s^2 , de la ecuación característica.

$$2223s^2 + K_u = 0$$

$$2223s^2 + 522.55 = 0$$

$$s = \sqrt{\frac{522.55}{2223}}\sqrt{-1}$$

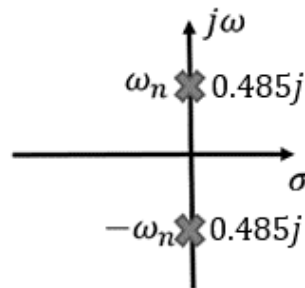
$$s = \sqrt{0.2350652272}\sqrt{-1}$$

$$s = \pm 0.485j = \omega_n$$

Un sistema oscilatorio es aquel que posee únicamente polos conjugados con partes imaginarias en un sistema de segundo orden, tal como se representa en el plano complejo de la figura 63.

Figura 63

Plano complejo de un sistema de segundo orden



Nota: Se observa polos conjugados en estado crítico en el plano complejo.

A partir de ω_n ya se puede calcular el periodo crítico P_u , como se muestra en la figura 64 de las ecuaciones desarrolladas.

Donde: $\pm 0.485j = \omega_n$

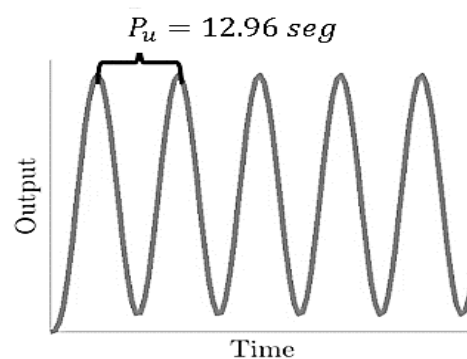
$$P_u = \frac{2\pi \text{ rad}}{\omega_n} \quad (131)$$

$$P_u = \frac{2\pi \text{ rad}}{0.485 \text{ rad/seg}}$$

$$P_u = \frac{2\pi}{0.485 \text{ seg}}$$

Figura 64

Periodo crítico del sistema P_u



Nota: Se muestra el periodo crítico calculado en una oscilación sostenida.



Se reemplaza los valores en la tabla de Ziegler Nichols para el segundo método para obtener las ganancias.

$$K_p = 0.6K_u \quad (132)$$

$$K_p = 0.6(522.55) = 313.53$$

$$\tau_i = 0.5K_u \quad (133)$$

$$\tau_i = 0.5(12.96) = 6.48$$

$$\tau_d = 0.125K_u \quad (134)$$

$$\tau_d = 0.125(12.96) = 1.62$$

Con los valores del controlador PID disponibles, se procederá a ajustar la función de transferencia del controlador PID.

Se sustituyen los valores obtenidos de K_p , τ_i y τ_d , en la función de transferencia del controlador PID.

$$G_c(s) = 313.53 \left(1 + \frac{1}{6.48s} + 1.62s \right)$$

$$G_c(s) = 313.53 \left(\frac{6.48s + 1 + 10.4976s^2}{6.48s} \right)$$

$$G_c(s) = 48.3843 \left(\frac{\frac{6.48s}{10.4976} + \frac{1}{10.4976} + \frac{10.4976s^2}{10.4976}}{\frac{s}{10.4976}} \right)$$

$$G_c(s) = 507.92 \left(\frac{0.62s + 0.0953 + s^2}{s} \right)$$

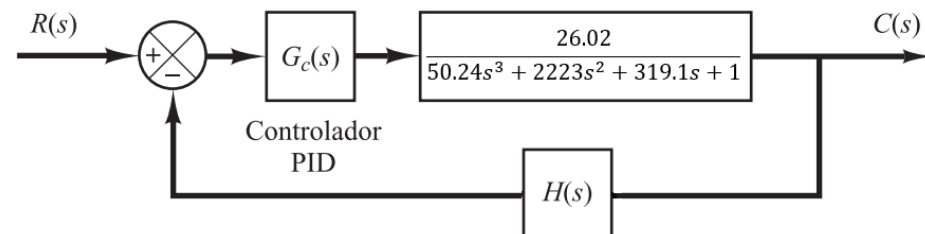
$$G_c(s) = 507.92 \left[\frac{(s + 0.3383)(s + 0.28172)}{s} \right]$$

Para la simulación en lazo cerrado del control PID de la planta se realiza en el software de Simulink de Matlab, donde se colocará los valores obtenidos mediante el cálculo matemático desarrollado en este apartado.

La figura 65, muestra la implementación del diagrama de bloque de lazo cerrado de control PID, para ello se obtuvo las ganancias de K_p , τ_i y τ_d , estos valores obtenidos se emplearán para la simulación, donde se muestra la gráfica de tiempo de reacción de la planta cuando se ingresa un escalón unitario.

Figura 65

Diagrama de bloque en lazo cerrado de la planta y controlador



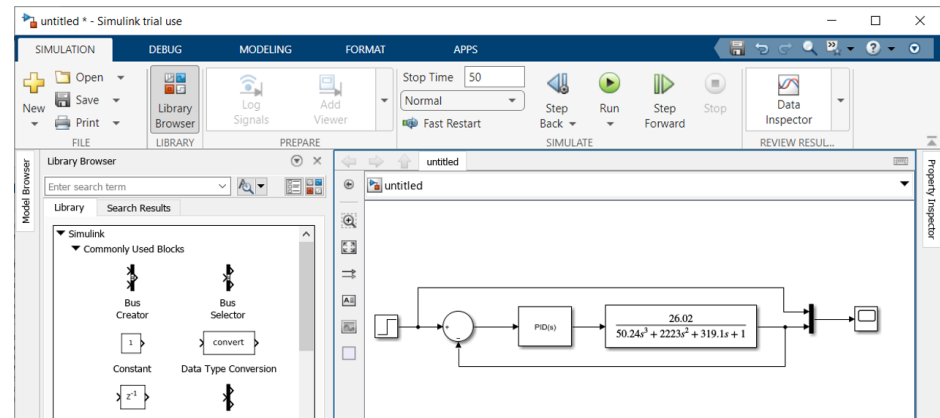
Nota: Diagrama de bloque para el cálculo de controlador PID.

En el bloque de parámetros del controlador PID, tal como se muestra en la figura 66 de Simulink, se introducirán las ganancias de K_p , τ_i y τ_d , que se obtuvo, también se nuestro el diagrama de bloque del control implementado en Simulink está dada de la siguiente forma:

$$G_c(s) = P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}} \quad (135)$$

Figura 66

Implementación del control PID, en Simulink



Nota: Implementación del diagrama en lazo cerrado, para simulación en software simulink.

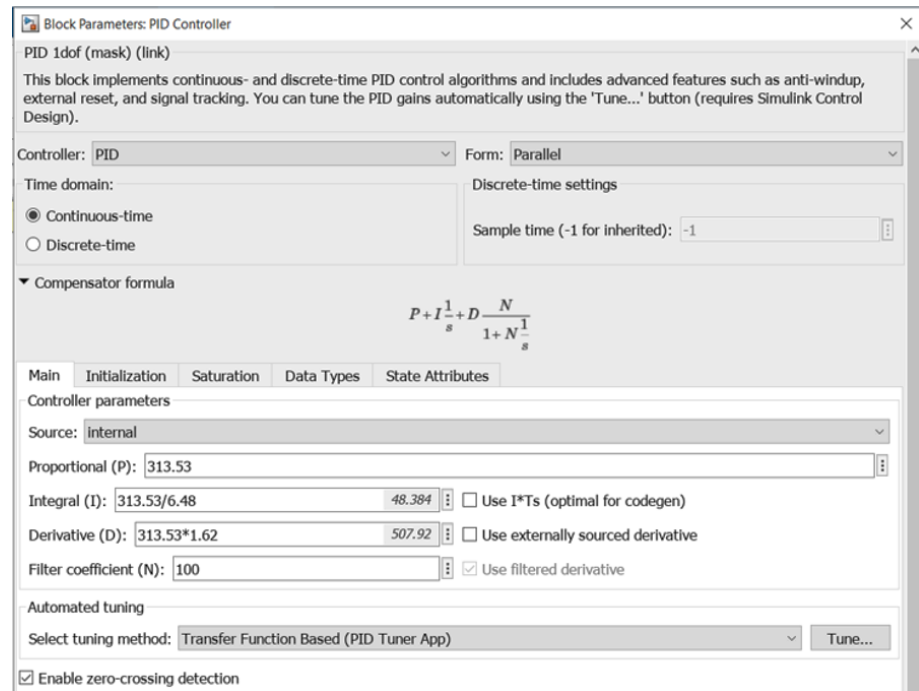
Se realiza un arreglo para ingresar los datos en el simulador de simulink. Se tiene las siguientes ecuaciones, que se deben de reemplazar en los parámetros proporcional integral y derivativo obtenido para el controlador PID, como se muestra en la Figura 67.

Se realiza la simulación con los siguientes datos calculados ganancia proporcional: $K_p = 313.53$, integral: $\tau_i = 6.48$ y derivativo: $\tau_d = 1.62$ donde se muestra el escalón unitario aplicado en la entrada o set-point del sistema,

También se puede ver la respuesta transitoria del control PID en el sistema mostrado en la figura 68, donde el tiempo de asentamiento es de 35 segundos y el sobreimpulso máximo alcanza el 8%. Este resultado fue obtenido mediante el segundo método de Ziegler-Nichols.

Figura 67

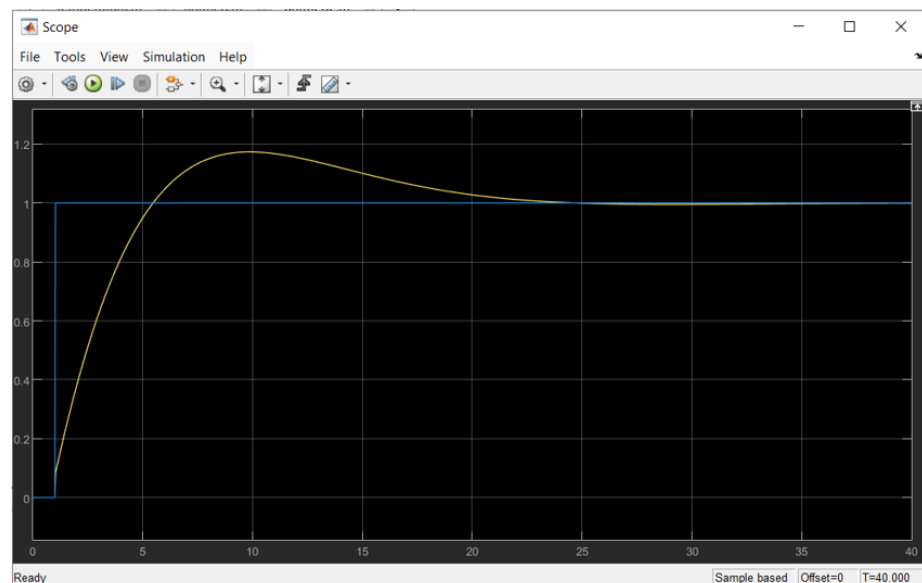
Bloque de parámetros del controlador PID.



Nota: La figura muestra los parámetros de la ganancia proporcional integral y derivativo que se está empleando para realizar la simulación del control PID para el segundo método de Ziegler-Nichols.

Figura 68

Respuesta transitoria del sistema implementado



Nota: Simulación de la respuesta transitoria en el segundo método de Ziegler-Nichols.

3.8.3.3. Control PID por cancelación de polos

El control PID mediante cancelación de polos es un método de diseño que ajusta los parámetros del controlador proporcional integral y derivativo con la finalidad de eliminar ciertos polos presentes en el sistema de la planta.

Este método se basa en el análisis del modelo del sistema o función de transferencia y busca simplificar el sistema en lazo cerrado para lograr un mejor desempeño dinámico del modelo de la planta que está representada por la siguiente ecuación:

$$G(s) = \frac{K_p}{\tau s + 1} \quad (136)$$

El controlador PI viene dado por la siguiente expresión:

$$C(s) = \frac{K_c(T_i s + 1)}{T_i s} \quad (137)$$

Para calcular el tiempo integral del control PI, se cancela el polo con el cero al decir que T_i es igual a τ . Adicionalmente coloca un polo en el origen que vendría a ser s

$$T_i = \tau \quad (138)$$

Se elabora igualmente la función de transferencia en lazo cerrado para el control mediante cancelación de polos; la ecuación 140 describe el lazo cerrado correspondiente al método utilizado.

$$H(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} \quad (139)$$

$$H(s) = \frac{\frac{K_c(T_i s + 1)K_p}{T_i s (\tau s + 1)}}{1 + \frac{K_c(T_i s + 1)K_p}{T_i s (\tau s + 1)}} \quad (140)$$

$$H(s) = \frac{\frac{K_c K_p}{\tau s}}{1 + \frac{K_c K_p}{\tau s}} \quad (141)$$

$$H(s) = \frac{K_c K_p}{\tau s + K_c K_p} \quad (142)$$

$$H(s) = \frac{1}{\frac{\tau}{K_c K_p} + 1} \quad (143)$$

La constante de tiempo de nuestro lazo cerrado sería:

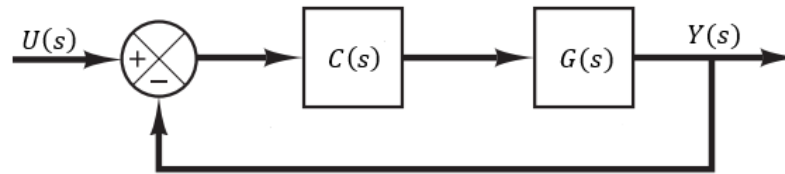
$$\tau_d = \frac{\tau}{K_c K_p} \quad (144)$$

$$K_c = \frac{\tau}{\tau_d K_p} \quad (145)$$

Para la cancelación de polos el parámetro integral del controlador se debe de cancelar con el polo de la planta. Debemos seleccionar una constante de tiempo deseado como diseño de ingeniería, para ello se usa una constante de tiempo de 45 segundos, esto es para una estabilización del proceso en un tiempo de 180 segundos, sabiendo que la estabilización es 4 veces a la constante de tiempo definido, y su diagrama de bloques está en la figura 69.

Figura 69

Bloque de control cerrada



Nota: diagrama de bloque en lazo cerrado de control PID para el método por cancelación de polos.

Ahora se realizará la estimación para el método de cancelación de polos, se empleará una ecuación de primer orden con cero ceros y un polo, no se aplicará el retardo de tiempo, esto se selecciona en la ventana de Process Model del software de Matlab. La figura 70 presenta la función de transferencia seleccionada para el modelo de la planta, caracterizada por tener un único polo y ausencia de tiempo de retardo.

Figura 70

Estimación del modelo de proceso

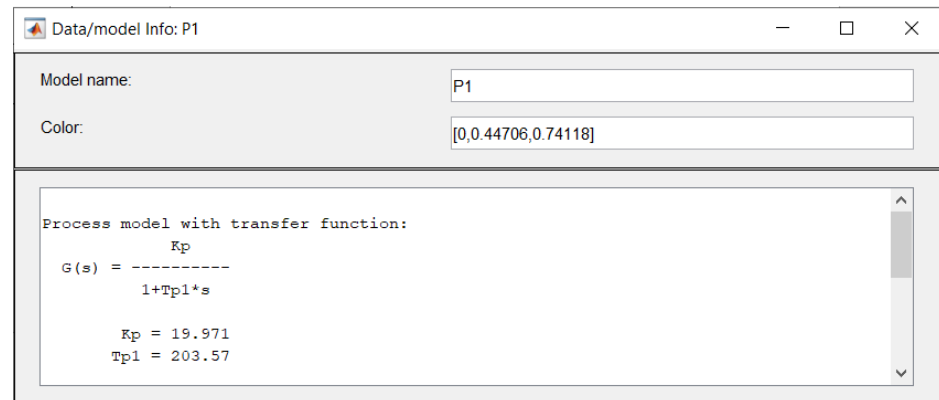
Par	Known	Value	Initial Guess	Bounds
K	<input type="checkbox"/>	19.9708	Auto	[-Inf Inf]
Tp1	<input type="checkbox"/>	203.57	Auto	[0 203413.66]
Tp2	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]
Tp3	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]
Tz	<input type="checkbox"/>	0	0	[-Inf Inf]
Td	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]

Initial Guess: Auto-selected, From existing model, User-defined

Nota: estimación de la planta con un polo, cero ceros y sin retardo.

Figura 71

Modelo matemático estimado



Nota: Se observa el modelo de la función de transferencia y las ganancias.

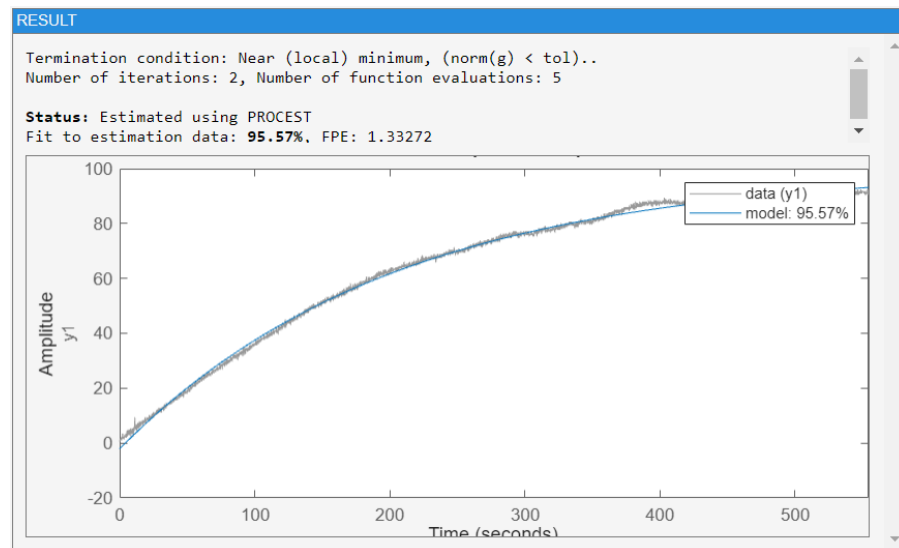
La estimación del modelo matemático se aprecia en la figura 71. la ecuación con cero ceros y un polo, del modelo seleccionado para este método de control, la estimación es de 95.57%, lo que indica que la curva temperatura y su comportamiento son iguales de la planta al momento de aplicarle un escalón unitario en la entrada.

Se observa en la figura 72 el resultado de la estimación del comportamiento del modelo matemático con los valores de temperatura tomada de la celda colectora donde tenemos un aproximado comparativo de un 95%.

Lo cual nos indica que la función de transferencia estimada es ideal para este proceso de control ya que se observa en la gráfica la amplitud en la que puede responder el sistema.

Figura 72

Curva del modelo matemático estimado.



Nota: Estimación de la data que se obtuvo con 95.57% de igualdad

La figura 73 muestra la función de transferencia resultante para la planta o colector solar modular, con la cual se calculará las ganancias de proporcionalidad, integrativo y derivativo del controlador. A continuación, hallaremos los parámetros deseados para este método de control PID.

Figura 73

Función de transferencia estimado



Nota: función de transferencia del método de cancelación de polos.

Teniendo la función de transferencia de la planta.

$$G(s) = \frac{19.79}{203.6s + 1}$$



$$T_i = 203.6$$

Reemplazando valores en el controlador se tiene:

$$C(s) = \frac{K_c(203.6s + 1)}{203.6s}$$

Se resolvió en lazo cerrado, al reemplazar valores:

$$H(s) = \frac{\frac{K_c(203.6s + 1)19.79}{203.6s(203.6s + 1)}}{1 + \frac{K_c(203.6s + 1)19.79}{203.6s(203.6s + 1)}}$$

Se obtuvo la función de transferencia en lazo cerrado:

$$H(s) = \frac{K_c 19.79}{203.6s + K_c 19.79}$$

$$H(s) = \frac{1}{\frac{203.6}{K_c 19.79} + 1}$$

Se resolvió la constante de tiempo deseada τ_d :

$$\tau_d = \frac{203.6}{K_c 19.79}$$

Se despeja K_c de la ecuación:

$$K_c = \frac{203.6}{\tau_d 19.79}$$

Donde τ_d está.

$$\tau_d = \frac{180}{4} = 45$$

La constante de controlabilidad K_c .

$$K_c = \frac{203.6}{45 * 19.79} = 0.23$$

Para este caso es importante estimar la ubicación correctamente del polo para así realizar el cancelamiento con el controlador, esto es muy complicado en la práctica, debido al grado de incertidumbre que existe al estimar el modelo.

3.8.3.4. Control PID por asignación de polos

Para el control mediante asignación de polos del controlador, se emplearon solo las partes proporcional e integral, dejando la parte derivativa en cero.

El objetivo es asignar polos al proceso para que funcione según lo esperado. La función de transferencia del modelo de proceso o planta está representada por la siguiente ecuación:

$$G(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{k}{s^2 + as + b} = \frac{A}{B} \quad (146)$$

Se muestra la ecuación del controlador proporcional, integral y derivativo para la asignación de polos y está representada por la siguiente expresión matemática:

$$C(s) \frac{k_c \tau_d s^2 + k_c s + \frac{k_c}{\tau_i}}{s} = \frac{d_2 s^2 + d_1 s + d_0}{s} = \frac{D}{E} \quad (147)$$

Al realizar el desarrollo, se obtiene la función de transferencia en lazo cerrado correspondiente a la asignación de polos, tal como se muestra en la ecuación:

$$H(s) = \frac{k(d_2s^2 + d_1s + d_0)}{s^3 + (a + kd_2)s^2 + (b + kd_1)s + kd_0} \quad (148)$$

Se establece parametros de diseño de una funcion de transferencia de segundo orden para ello propone las condiciones de diseño como el tiempo de establecimiento de $T_{ss} = 220seg.$ y maximo pico de un $M_p = 10\%$, con los valores se calcula el factor de amortiguamiento:

$$M_p = 100e^{\frac{-\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (149)$$

$$\zeta = \frac{\sqrt{\log\left(\frac{M_p}{100}\right)^2}}{\sqrt{\pi^2 + \log\left(\frac{M_p}{100}\right)^2}} \quad (150)$$

$$\zeta = 0.6901$$

Ahora se calcula la frecuencia natural del sistema y si admite una tolerancia del 2%.

$$\omega_n = \frac{4}{\zeta T_{ss}} \quad (151)$$

$$\omega_n = 0.0263$$

Con los datos obtenidos, se calcula el polinomio requerido que contiene dos términos complejos conjugados y se asigna al sistema, utilizando los coeficientes p_1 y p_2 del polinomio de segundo orden vendría hacer el polinomio característico de la siguiente forma:



$$s^2 + p_1s + p_2 = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (152)$$

$$p_1 = 2\zeta\omega_n \quad (153)$$

$$p_1 = 0.0364$$

$$p_2 = \omega_n^2 \quad (154)$$

$$p_2 = 6.9413 \cdot 10^{-4}$$

$$G(s) = \frac{K6.9413 \cdot 10^{-4}}{s^2 + 0.0364s + 6.9413 \cdot 10^{-4}}$$

Donde los polos conjugados son:

$$s_{1,2} = -0.0182 \pm j0.0191$$

Por lo tanto, se calcula los parámetros de k_c y t_i con las siguientes ecuaciones.

$$k_p = \frac{P_1\tau - 1}{K} \quad (155)$$

$$k_p = 4.6329$$

$$t_i = \frac{k_p K}{P_2\tau} \quad (156)$$

$$t_i = 43.3832$$

3.8.4. Desarrollo del control PID en Arduino

El controlador PID es el más popular y utilizado, debido a la facilidad de comprensión y robustez que ofrece para ajustar una o varias variables de un proceso específica (temperatura, presión, peso, nivel, etc.). El término PID se

refiere al Control Proporcional, Integral y Derivativo, cuyas tres componentes permiten gestionar las variaciones de un proceso considerando el presente, el pasado y el futuro. Cada una de estas partes posee características particulares. Es importante comprender que el controlador PID actúa sobre error. Con esto quiere decir que la salida del controlador viene a ser la diferencia ente el set-point y la realimentación o valor medido por el sensor y se tiene la ecuación del error.

$$e(k) = r(k) - y(k) \quad (157)$$

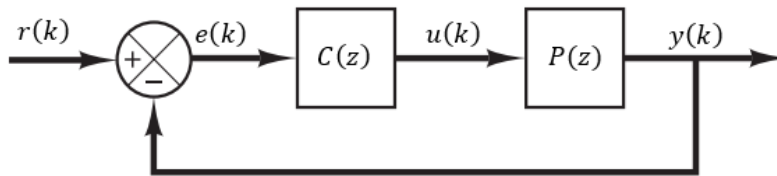
El componente proporcional amplifica o reduce la señal de error. Es decir, la salida será mayor y positiva cuando el error del sistema sea grande, porque el factor de ganancia K_p se multiplica por dicho error. Esta ganancia proporcional actúa sobre el error en el momento actual.

Por otro lado, el término integral añade al controlador una capacidad de memoria, ya que integra a lo largo del tiempo los valores anteriores del error, los valores pasados del error, también la parcela integral en estado estacionario elimina el error, lo que hace es que llegue al set-point la variable de control, en resumen, la parcela integradora actúa con el error en el tiempo pasado.

El término derivado, hace referencia a la parcela derivativa y su comportamiento o acción es la predicción futura del error, lo que utiliza una línea tangente al punto del error actual para una proyección. La parcela derivativa es la que estima el error futuro en el tiempo. Para poder comprender cómo es el comportamiento o funcionamiento de un controlador PID, primero, se puede observar la representación tradicional usando un diagrama de bloques, tal como se muestra en la figura 74:

Figura 74

Diagrama de bloque de lazo cerrado en muestras



Nota: Bloques para el desarrollo del control proporcional integral y derivativo en Arduino.

El diagrama de bloques mostrado en la figura 74 ilustra las señales en función del tiempo discreto, representadas por el índice de muestreo k , así como el controlador y el proceso mediante las funciones $C(z)$ y $P(z)$, definidas en términos de la variable compleja z . Esto evidencia que se trata de un sistema de control digital, donde las señales se procesan en intervalos de tiempo específicos. En este esquema $r(k)$ corresponde a la señal de referencia o punto de consigna, $e(k)$ representa la señal de error, obtenida como la diferencia entre $r(k)$ e $y(k)$, $C(z)$ es la función del controlador PID en su forma discreta, mientras que, $u(k)$ es la señal de control generada. Por su parte, $P(z)$ representa la planta en su modelo discreto, y $y(k)$ es la salida del proceso. Además, se incluye la expresión matemática del controlador PID en su forma continua.

$$u(t) = k_p e(t) + \frac{k_p}{t_i} \int_0^t e(t) dt + k_p t_d \frac{de(t)}{dt} \quad (158)$$

EL control PID tiene tres parámetros k_p, t_i, t_d que corresponden para la ganancia proporcional, tiempo derivativo e integral. Hay muchas técnicas que determinan el ajuste o sintonización de los parámetros del controlador. Para ello se desarrollará tres formas diferentes de sintonización del controlador, como la sintonía o ajuste de Ziegler Nichols. Para este caso se implementará en Arduino

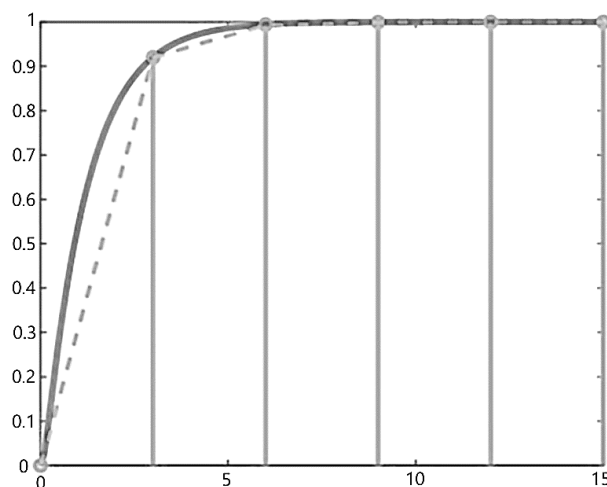
el control PID, y se desarrollara en forma digital o discreta la ley de control que ha sido representado en la figura 74.

3.8.4.1. Selección del periodo de muestreo

Cuando se trata de sistemas de control, se puede realizar aproximaciones rápidas para determinar el tiempo de muestreo según las necesidades que se tiene en el proyecto de control. Cuando se reduce demasiado la frecuencia de muestreo de una señal, aumentan los problemas de precisión y errores de redondeo durante la implementación. Esto es especialmente crítico si se emplea un procesador de punto fijo, ya que no es recomendable tomar muestras mucho más lentas que la dinámica del proceso. Por esto ocurre la pérdida de información ya que el muestreo no contiene información necesaria de la dinámica del proceso. En la figura 75 se muestra la reconstrucción de la señal mediante las muestras tomadas en un tiempo mayor, donde hay más pérdida de información de la señal.

Figura 75

Periodo de muestreo de una señal

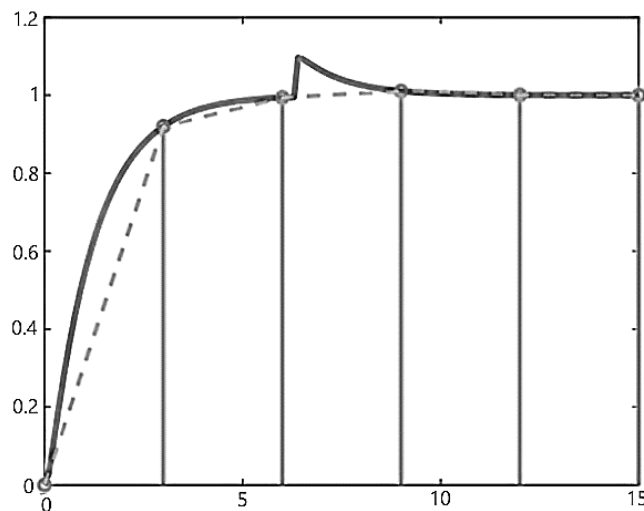


Nota: Forma representativa de la reconstrucción del muestreo en (t).

Al responder a las perturbaciones como se muestra en la figura 76, entre una medida de resultado y la siguiente del proceso opera en un lazo abierto o constante. En caso de producirse una perturbación, su efecto solo podrá compensarse tras volver a medir la salida. Por lo tanto, es preferible un período de muestreo más corto en el tiempo para compensar las perturbaciones.

Figura 76

Periodo de muestreo con perturbación en la señal



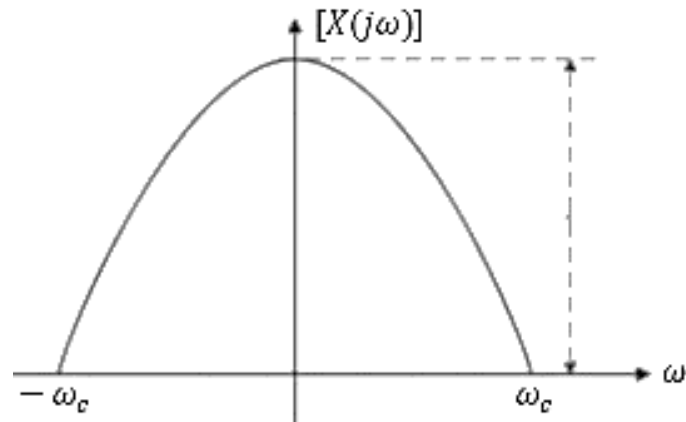
Nota: Forma representativa de perturbación de toma de muestra en tiempo (t) prolongado.

Por lo tanto, se debe elegir un tiempo corto de muestreo para que se la señal no tenga pérdida de información y se obtenga la señal original.

De acuerdo con el teorema de Shannon, si la frecuencia de muestreo es suficientemente alta en comparación con la frecuencia más alta presente en una señal de tiempo continuo, entonces es posible conservar la amplitud de dicha señal dentro de la envolvente generada por las muestras. Véase la figura 77.

Figura 77

Espectro de frecuencia, ancho de banda $-\omega_c, \omega_c$



Nota: Ancho de banda (García Jaimes, 2009)

$$\omega_s = \frac{2\pi}{T} \quad (159)$$

$$\omega_s \geq 2\omega_c \quad (160)$$

ω_s : frecuencia de muestreo.

T : periodo de muestreo.

ω_c : componente de más alta frecuencia de la señal.

Donde el ancho de la banda del sistema en lazo cerrado está definido por ω_c , se estima la frecuencia de muestreo dentro de los siguientes intervalos.

$$-\omega_c \leq \omega_s \leq \omega_c \quad (161)$$

3.8.4.2. Desarrollo de control PID discreto para Arduino.

En el caso del PID discreto, se obtiene su forma discretizada a partir de la ecuación dada, utilizando la aproximación trapezoidal para el término

integral y la diferencia entre dos puntos para representar el término derivativo, tal como se muestra en la ecuación:

$$\int e(t)dt = \sum \left[\frac{e(k) - e(k-1)}{2} \right] T_s \quad (162)$$

$$\frac{de(t)}{dt} = \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \quad (163)$$

Donde T_s , viene hacer el tiempo de muestreo, lo aplicamos para ejecutar, cuanto tiempo se debe ejecutar la ley de control discreta. Donde se viene trabajando con k muestras, esto significa que el error está representado por la variable e . Donde $e(k)$ representa el error en el instante de muestreo actual, mientras que $e(k-1)$ corresponde al error en el instante de muestreo anterior o pasado. Es fundamental saber elegir correctamente el periodo de muestreo T_s cuando se quieren implementar controles digitales.

$$T_s < \frac{\theta}{4} \quad (164)$$

$$\frac{t_{ss}}{10} \leq T_s \leq \frac{t_{ss}}{20} \quad (165)$$

Para el lazo cerrado, cuando el controlador PID opera sobre la planta, la estabilización será aproximadamente en $t_{ss} = 200$ segundos, entonces se puede elegir el periodo de muestreo en el siguiente intervalo indicado en la ecuación.

Para el caso de control de temperatura PID, elegiremos por diseño un $T_s = 8 \text{ seg}$, porque está en el rango de: $10.365 \leq T_s \leq 20.73$. En la

implementación del controlador PID de temperatura en Arduino, se estima estrategias diferentes a partir de parámetros continuos k_p, t_i, t_d , en este caso se tomara el retardo de tiempo del modelo continuo como se expresa en la ecuación.

$$\theta = L + T_s/2 \quad (166)$$

Donde la aproximación al retardo está representada por $T_s/2$ al muestreador y el retenedor, donde T_s viene a ser el periodo de muestreo.

Teniendo la ecuación continua del controlador proporcional integral y derivativo, se discretizará la ecuación para obtener el control PID discreto.

Obteniendo así la función de transferencia de pulsos del controlador digital:

$$C(z^{-1}) = \frac{u(k)}{e(k)} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (167)$$

$$q_0 = k_p \left[1 + \frac{T_s}{2t_i} + \frac{td}{T_s} \right] \quad (168)$$

$$q_1 = k_p \left[1 + \frac{T_s}{2t_i} + \frac{2td}{T_s} \right] \quad (169)$$

$$q_2 = \frac{k_p td}{T_s} \quad (170)$$

Con estas ecuaciones, la ley de control que se introduce para el control proporcional, integral y derivativo discreto en Arduino, ahora resolvemos para $u(k)$.

$$u(k)(1 - z^{-1}) = q_0e(k) + q_1z^{-1}e(k) + q_2z^{-2}e(k) \quad (171)$$

$$u(k) - u(k)z^{-1} = q_0e(k) + q_1z^{-1}e(k) + q_2z^{-2}e(k) \quad (172)$$

$$u(k) = u(k)z^{-1} + q_0e(k) + q_1z^{-1}e(k) + q_2z^{-2}e(k) \quad (173)$$

Aplicando transformada inversa Z, para obtener nuestra ecuación en diferencias, es la ecuación implementable en microcontroladores que vendría ser la ecuación de control PID. Haciendo la aproximación trapezoidal y la diferencia de dos puntos de forma discreta, y esta ecuación es la que debe implementar dentro del microcontrolador, en este caso el Arduino. Aplicando la transformación Z inversa, se obtiene la ecuación en diferencia.

$$u(k) = u(k - 1) + q_0e(k) + q_1e(k - 1) + q_2e(k - 2) \quad (174)$$

Donde, $u(k)$ representa la señal de control en el instante actual, $u(k - 1)$ corresponde a la señal de control del muestreo anterior, $e(k)$ es el error presente $e(k - 1)$ es el error registrado en el muestreo previo, y $e(k - 2)$ hace referencia al error ocurrido dos muestras atrás.

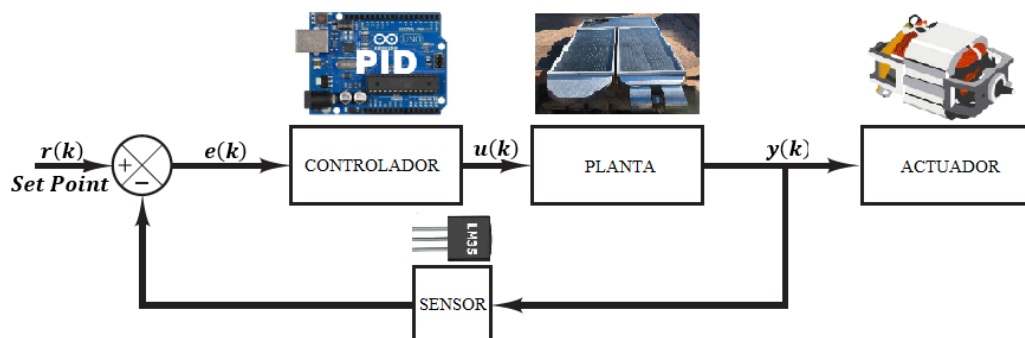
3.8.5. Implementación del modelo de controlador PID

Se observa el mecanismo de control que permite regular la velocidad a través de un lazo de retroalimentación ver figura 78, utilizando sensor de temperatura, la variable real contra la variable deseada es la que controla el controlador PID en un proceso. El error es la diferencia entre el valor de la variable de proceso $y(k)$ y el valor del de ajuste o set-point $r(k)$. Se expresa matemáticamente en función del tiempo $e(t) = r(t) - y(t)$, el control puede proporcionar una acción reguladora adaptada a las necesidades del proceso

específico como es el caso. En la respuesta del controlador el cual sobrepasa un punto de ajuste y la oscilación del sistema, se describe como respuesta de control ante un error. La señal analógica proporcionada por el sensor LM35 al controlador, es el punto actual del proceso o planta, esta señal podrá ser corriente, voltaje, frecuencia o otra magnitud. El controlador recibe la señal que se desea alcanzar, a esta señal se conoce como set-point o punto de consigna. Para que sea entendida hombre maquina, se implementaría una interfaz de monitoreo y visualización del comportamiento del proceso y los cambios que éste trae consigo. Tal como se observa en el diagrama de lazo cerrado del controlador PID (Proporcional, Integral y Derivativo), véase la figura 78.

Figura 78

Diseño del esquemático en lazo cerrado para control PID.



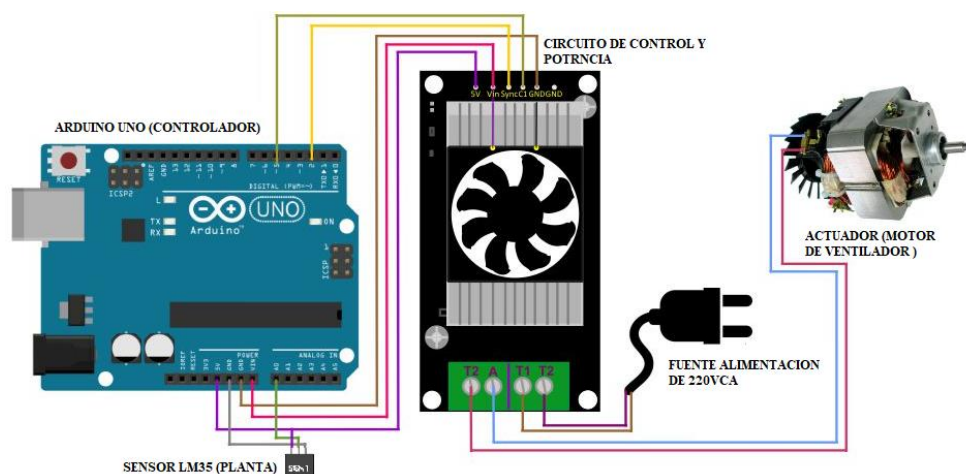
Nota: Se aprecia el bloque a la que pertenece cada componente en un lazo cerrado.

Los parámetros proporcional integral y derivativo y sus ajustes es garantizar que el lazo de control corrija eficientemente los efectos de las perturbaciones en el menor tiempo posible. Se debe alcanzar el mínimo error integral. En caso que los parámetros de la ganancia proporcional, integral y derivativo sean incorrectamente calculados o desarrollados, donde se apreciará oscilaciones, variaciones de control de salida, no llegara al punto de consigna, hasta puede ocasionar eventos no deseados. Por ello se debe tener en cuenta que

todo el desarrollo del sistema se control sea simulado previamente antes de implementar con los valores óptimos de control PID, generalmente es muy importante la estabilidad del proceso de control, el proceso debe de responder según el tiempo preestablecido o calculado, en la figura 79 se observa esquemático de conexionado del control proporcional integral y derivativo que se implementara.

Figura 79

Conexionado de la etapa de control y potencia

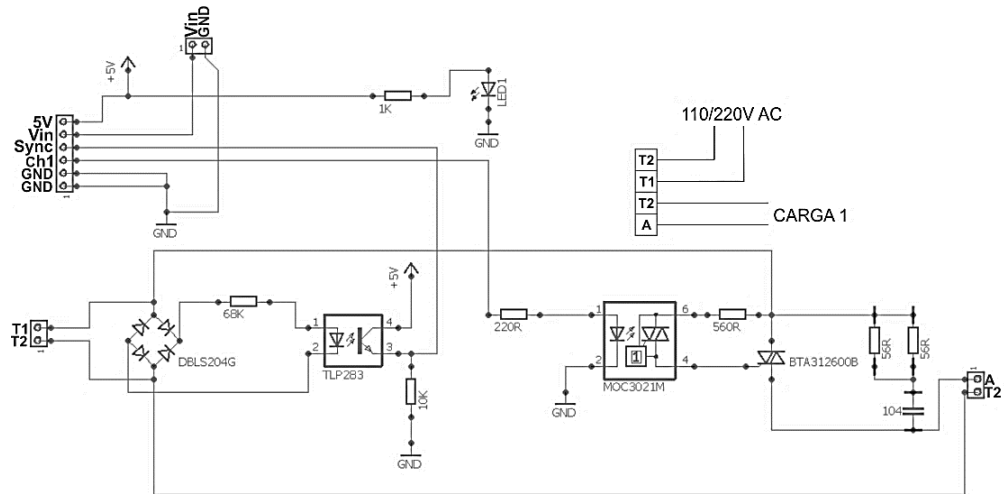


Nota: Esquemático de conexionado del circuito de control y potencia.

Esta etapa de potencia es capaz de modificar la energía eléctrica dependiendo de si la carga es resistiva o inductiva. El Arduino es el dispositivo controlador que está programado, donde toma la señal del sensor LM35, que está ubicada dentro de la habitación a calefactar. La etapa de potencia esta sincronizada a un dispositivo dimmer de cruce por cero, la que se encarga de variar el voltaje de salida hacia el ventilador según el controlador. Dimmer digital ha sido diseñado para operar con señales de control digital a través de una red PWM sincronizada, respondiendo de acuerdo con la señal que reciba. La figura 80 presenta el diagrama esquemático correspondiente a su implementación.

Figura 80

Circuito de dimmer digital de cruce por cero



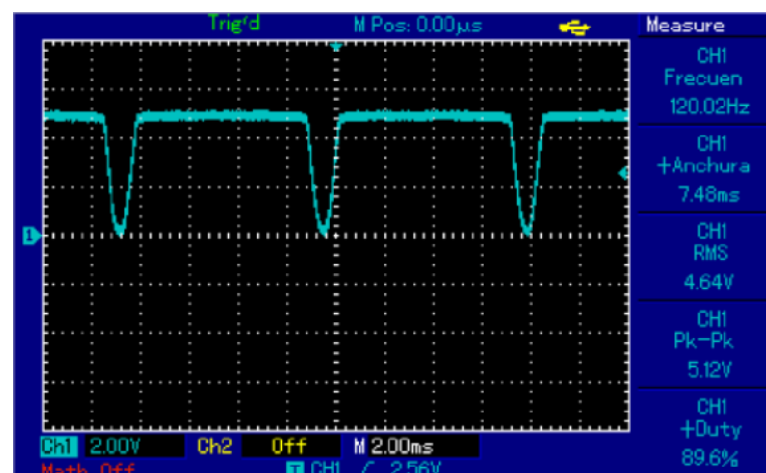
Nota: Diseño de circuito dimmer PWM de cruce por cero, para la etapa de potencia.

3.8.5.1. Señales en osciloscopio del dimmer digital.

En la figura 81 se observa la muestra de la red a 60 Hz, la frecuencia en el osciloscopio es de 120 Hz, debido a que la señal seno cruza dos veces por el cero en su periodo.

Figura 81

Señal de salida del pin SYNC (cruce por cero)

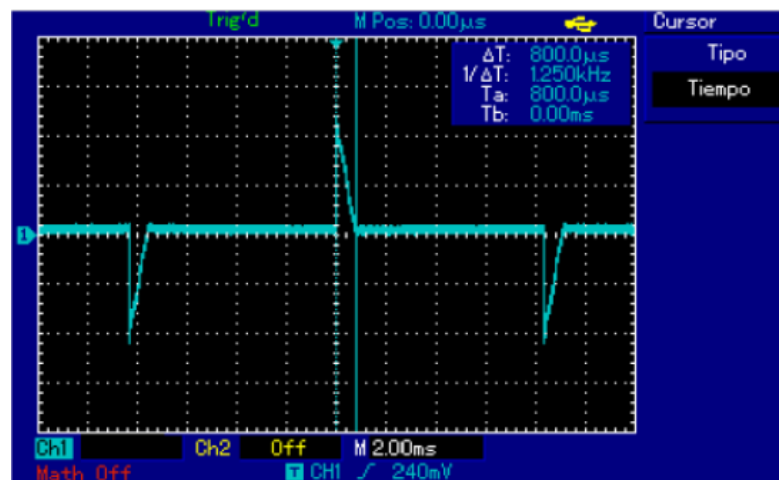


Nota: Señal en el osciloscopio que cruza dos veces por el cero en un periodo.

Con una señal de salida de potencia baja, pasa directamente a cero voltios, con el fin de evitar intermitencias no deseadas en la carga, sin embargo, es una regla establecida en el código, pero el usuario puede cambiarlo a su conveniencia como se aprecia en las figuras 82,83 y 84.

Figura 82

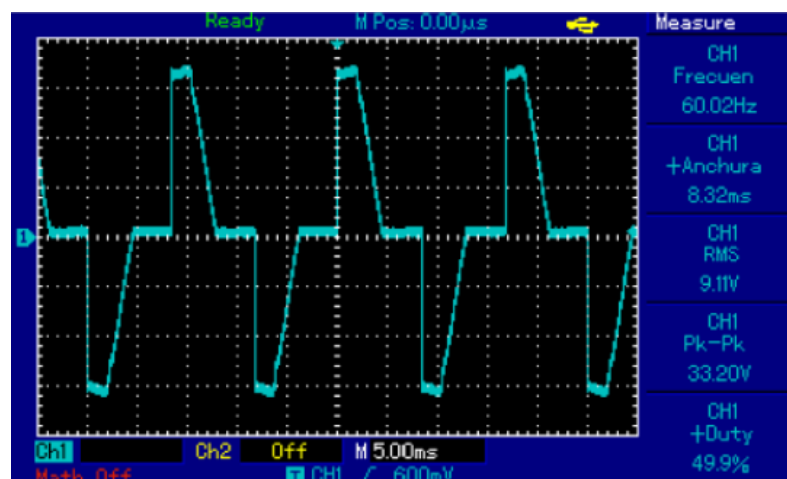
Salida de potencia mínima



Nota: La figura muestra la salida de potencia de 10% de energía.

Figura 83

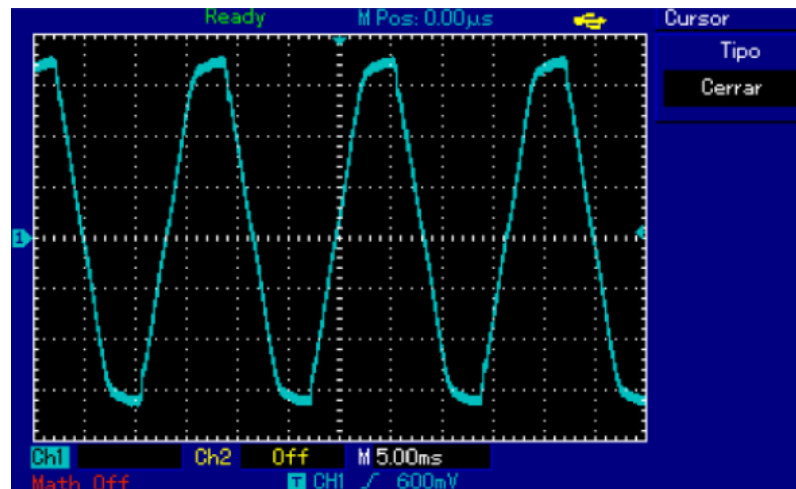
Salida de potencia al 50 % de energía.



Nota: potencia de energía al 50%.

Figura 84

Salida de potencia al 100% de energía.



Nota: Potencia de energía al 100%.

3.8.6. Implementación de la monitorización

El monitoreo es un proceso de observar, medir y controlar ciertos aspectos o actividades dentro de un sistema, con el fin de asegurar que estén cumpliendo los objetivos establecidos, donde busca obtener información constante o periódica sobre el estado de algo para tomar mejores decisiones informadas y corregir o mejorar posibles problemas.

El monitoreo tiene un propósito de control y evaluación que permita realizar un seguimiento continuo del proceso que estén alcanzando los objetivos establecidos, detección temprana de problemas que ayuden a identificar de manera temprana las fallas que puedan suceder, optimización facilita la mejora de proceso o sistema de control PID ya que proporciona datos que permiten hacer ajustes para un mejor rendimiento. El monitoreo de la temperatura puede ayudar a mejorar la eficiencia energética y ahorro de energía eléctrica, reduciendo así los costos y aumentando la rentabilidad. También ayuda a mantener un entorno de trabajo seguro al detectar y prevenir condiciones de temperatura peligrosas, además el

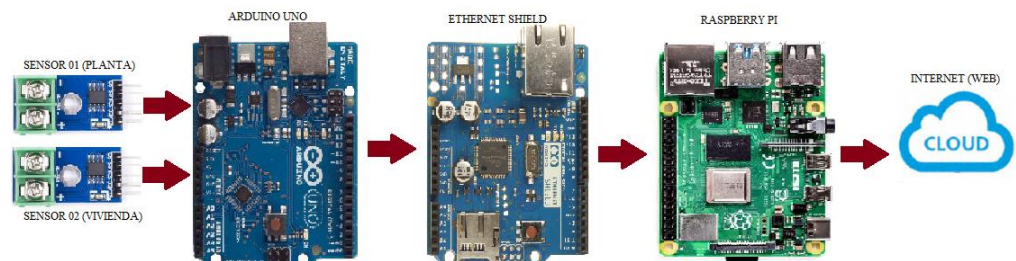
monitoreo de temperatura proporciona datos en tiempo real, lo que permite tomar acciones correctivas rápidas para mejorar el control del proceso. La topología del nodo del sensor de prueba se construyó utilizando dispositivos y sensores reales. La comunicación entre los nodos sensores se realizó mediante los protocolos de comunicación I2C y TCP/IP, luego los datos se enviaron al sitio web mediante el lenguaje de programación, también se utilizaron las librerías.

3.8.6.1. Monitorización mediante plataforma web

Como se muestra en la figura 85, para poder gestionar los datos registrados por los sensores uno y dos se debe realizar las conexiones hacia el Arduino UNO, donde se procesa los datos que se obtiene de las dos termocuplas que una de ellas está instalada en la salida del colector solar y la otra está instalada en la vivienda calefactada, los procesa como datos digitales para luego enviar mediante el ethernetshield que será como una pasarela de envío de datos hacia la nube o internet. El dispositivo electrónico raspberry pi es la que se encarga o hace el papel de router para permitir que el ethershield llegue a subir la información a la plataforma en la web desarrollada.

Figura 85

Esquemático de la monitorización de temperatura



Nota: dispositivos empleados en la implementación de monitoreo.

El monitoreo alberga una plataforma donde la red de sensores enlazados enfatiza la facilidad de uso y accesibilidad del usuario a través de una interfaz intuitiva.

Tabla 5

Plataforma de monitoreo en tiempo real

Temp. 1	Temp. 2	IP Cliente	ID Sensor	Fecha Hora
27.50	34.50	179.6.8.120	ROLIN-01	2025-01-16 10:27:41
26.75	34.50	179.6.8.120	ROLIN-01	2025-01-16 10:26:40
26.75	33.50	179.6.8.120	ROLIN-01	2025-01-16 10:25:40
26.25	31.25	179.6.8.120	ROLIN-01	2025-01-16 10:24:40
24.50	30.75	179.6.8.120	ROLIN-01	2025-01-16 10:23:40
24.75	31.00	179.6.8.120	ROLIN-01	2025-01-16 10:22:39
25.50	33.00	179.6.8.120	ROLIN-01	2025-01-16 10:21:39
26.25	34.50	179.6.8.120	ROLIN-01	2025-01-16 10:20:38
26.50	34.50	179.6.8.120	ROLIN-01	2025-01-16 10:19:38
27.25	34.75	179.6.8.120	ROLIN-01	2025-01-16 10:18:38
26.75	34.75	179.6.8.120	ROLIN-01	2025-01-16 10:17:37

Nota: Son los datos monitorizados mediante la web, en tiempo real.

Temp. 1, es la lectura de la temperatura que está instalada en la habitación o vivienda donde se controlará la calefacción a una temperatura deseada de 18°C, mientras la Temp. 2, vendría a ser la temperatura del colector solar modular en el entorno de salida, estas dos temperaturas se monitorizan y se observa en una plataforma web que se diseñó para el almacenamiento de los datos a medida que va cambiando con el transcurso del tiempo como se observa en la tabla 5. De esta forma el usuario puede evaluar y ver las temperaturas cambiantes en tiempo real, con un periodo de actualización en función de la toma de datos a cada minuto.



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1.1. Para el objetivo general

Se diseñó un sistema de calefacción utilizando un colector solar modular con control PID. La monitorización del sistema se realizó mediante sensores de temperatura y una interfaz de visualización de datos en la web. El diseño del sistema de calefacción solar compuesto por un colector solar modular de placa plana, un actuador que hace circular el aire caliente y un sistema de control PID implementado en una unidad de microcontrolador. El colector fue dimensionado para una vivienda promedio de Puno, considerando una radiación solar media de 5.24 kWh/m² según (Mercado & Machaca, 2017). La temperatura interna en la vivienda calefactada es entre 18°C a 22°C, el sistema logro mantener estas temperaturas durante el día en la vivienda calefactada, la celda colectora ha alcanzado temperaturas altas de 100°C en días soleados, como en los meses de junio, julio y agosto que se dan una mayor radiación solar en el distrito de Puno, y también en los meses de menor radiación solar se llegó a captar temperaturas de 30°C a 40°C

Para el control se implementó un algoritmo PID con sintonización automática para regular la temperatura del fluido caloportador. El sistema se ajustó a un set-point de 19°C, la cual controlará la velocidad del motor de la ventiladora para mantener la temperatura deseada en la vivienda en función de las mediciones en tiempo real. También se estableció un sistema de adquisición de



datos que permitió la monitorización del cambio de temperatura del colector solar, la temperatura ambiente de la vivienda y los datos se almacenan para su posterior análisis.

4.1.2. Para el primer objetivo específico

Para este objetivo, se diseñó un sistema físico de colector solar modular con un lazo de control PID y fue evaluado en términos de eficiencia térmica, estabilidad del sistema y capacidad de respuesta frente a las condiciones climáticas del distrito de Puno. Se optó por un colector solar modular de placa plana. El diseño del sistema proporciona una potencia térmica suficiente para mantener la temperatura interna de la vivienda en el rango de 18°C a 22°C deseado durante las horas de mayor demanda térmica, especialmente en los meses de diciembre, enero y febrero cuando la radiación solar es más baja. El control PID fue integrado para controlar el flujo de aire del colector solar para así regular la temperatura del fluido caloportador en la vivienda. La configuración del controlador se llevó a cabo utilizando estimaciones en el software Matlab, basadas en los datos de temperatura obtenidos de la celda colectora solar. Se ajustaron los parámetros PID con el fin de mejorar el desempeño del sistema. Para lograr un control PID óptimo, se aplicaron tres métodos de sintonización: en primer lugar, el método de Ziegler-Nichols; en segundo, la técnica de cancelación de polos; y, por último, el método de asignación de polos.

4.1.2.1. Método de Ziegler-Nichols

El método de Ziegler-Nichols es útil para obtener una sintonización inicial rápida y efectiva del controlador proporcional integral y derivativo sin la necesidad de cálculos complejos o modelos detallados, lo que lo



convierte en una herramienta popular en ingeniería de control. En el método de lazo abierto de la sintonía de Ziegler y Nichols este tipo de sintonía el pico es bastante alto por ello es muy agresivo, mediante cálculos matemáticos se encontró parámetros del controlador con las siguientes ganancias de: $k_p = 4.14$, τ_i y $\tau_d = 0.2$, para mejorar la respuesta del sistema, una de las formas para mejorar la respuesta es dividiendo la ganancia proporcional del controlador, ello hace que se suprime el pico de oscilación que se tiene al comienzo del control, hasta que se establezca la dinámica del proceso de control. Para la segunda forma de control en lazo cerrado de sintonización se realiza que la ganancia en límite del sistema sea estable, también debe tener polos de coordenadas complejas y al menos un tiempo largo antes de que los polos crucen el eje imaginario. Este método de lazo cerrado es un método fácil de utilizar y se obtuvo los siguientes parámetros de la ganancia crítica y el periodo crítico como resultados de diseño se tiene: $K_u = 522.55$ y $P_u = 12.96$ segundos, de la simulación se obtuvo los siguientes valores de respuesta transitoria de tiempo establecimiento es 35 segundos y sobre impulso máximo de 8%. En la figura 86 se muestra la respuesta transitoria del modelo de control implementado en campo donde se observa el tiempo de establecimiento de 180 segundos aproximadamente y un máximo pico de 10% como se observa en la respuesta transitoria que se obtuvo de las pruebas de control, según los cálculos matemáticos debería estabilizar el sistema en menor tiempo y sobre impulsó al momento de aplicar set-point en la entrada de control con valores de 80°C, esto da a conocer que el modelo matemático obtenido del colector solar modular es un aproximado pero no eficiente ya

que supera los valores de diseño del controlador, también se observa oscilaciones en el tiempo de estabilización. en conclusión, el método no es eficiente para este tipo de proceso de control de temperatura ya que se observa ciertos inconvenientes al momento de la estabilización y los tiempos deseados de diseño no ha sido cumplido con este método de control.

Figura 86

Respuesta transitoria en método de Ziegler-Nichols



Nota: Muestra la imagen el tiempo de respuesta transitoria de la celda colectora modular, la temperatura, set-point y el porcentaje de controlabilidad.

4.1.2.2. Método por cancelación de polos

Este método se usa principalmente para ajustar el comportamiento de un sistema de control, como sistemas electrónicos o mecánicos, a través



de la ubicación de los polos del sistema en el plano complejo. Los polos de un sistema dinámico son los valores en los cuales la función de transferencia del sistema se vuelva infinita. Estos polos determinan las características del comportamiento temporal del sistema, como la rapidez de respuesta y la estabilidad.

El método por cancelación de polos se refiere a la técnica de ajustar o reubicar los polos del sistema, para modificar sus características dinámicas. Esto se puede lograr agregando compensadores o controladores que modifiquen el lugar de los polos del sistema, o también mediante ajuste en los parámetros del sistema, para que ciertos polos no afecten el rendimiento de la manera no deseada, en los cálculos matemáticos realizados se obtuvieron los siguientes parámetros de ganancia para el control PID como: tiempo integral $T_i = 203.6$, tiempo deseado del controlador $\tau_d = 45$ definido por diseño y la constante de controlabilidad $K_c = 0.23$.

En este control basado en la cancelación de polos, se diseñó con el objetivo de estabilizar la planta en un tiempo de 180 segundos. No obstante, los resultados experimentales mostraron que la estabilización se logró en solo 80 segundos, como se aprecia en la figura 87.

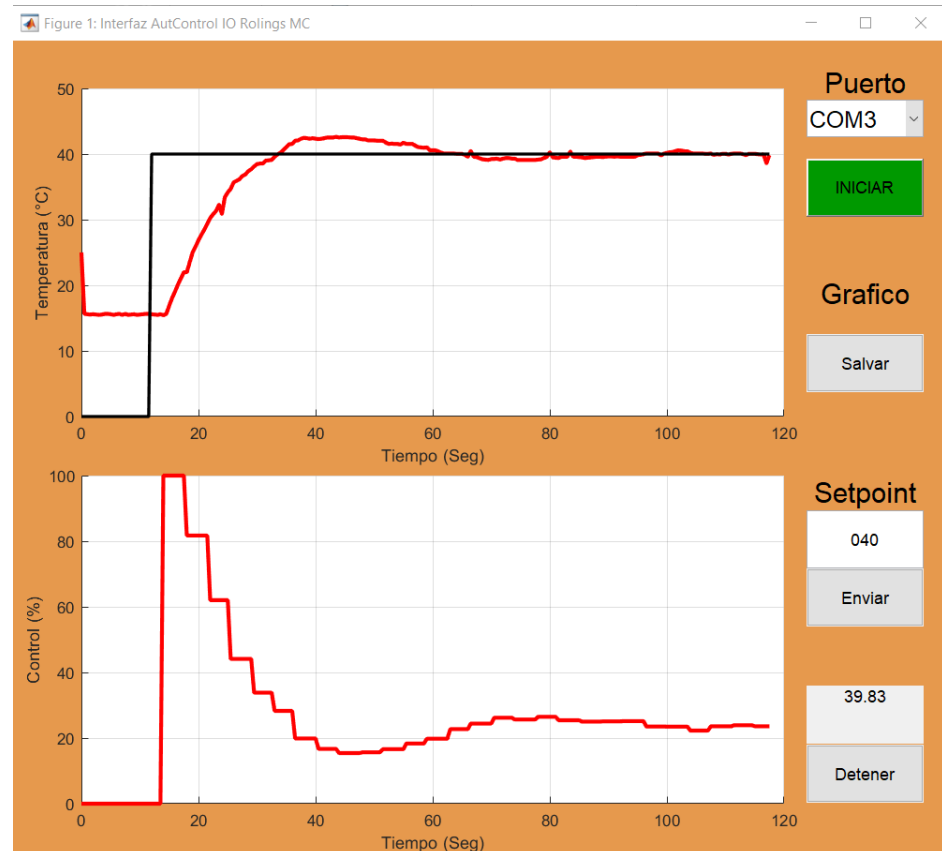
Además, se evidencia una respuesta transitoria del sistema o del colector solar modular, con un sobreimpulso del 5%. Este comportamiento indica que el control implementado resulta ser óptimo.

Las pruebas se realizaron con distintos valores de referencia (set-point), y en la figura se puede observar que la planta alcanza una

estabilización en 40 °C, cumpliendo así con las especificaciones de diseño establecidas.

Figura 87

Respuesta transitoria del método por cancelación de polos



Nota: Se muestra la respuesta transitoria del modelo de control por cancelacion de polos de la planta implementada.

La estabilidad mejora al reubicar los polos a posiciones más estables, también se puede evitar oscilaciones no deseadas o inestables. Es decir, cómo responde el sistema ante un cambio en las condiciones iniciales o entrada en el set-point.

Esto se nota en el tiempo de respuesta, la amortiguación y la rapidez de la estabilización, logrando que el sistema alcance el equilibrio de control en menor tiempo posible, por ello se concluye que el método



por cancelación de polos es el más adecuado y óptimo para este tipo de proceso, ya que resulto ser confiables al momento de realizar las pruebas de control en entornos diferente de temperatura, llegando a mantener el set-point predefinido, por tanto se recomienda el uso del controlador proporcional integral para el control de la calefacción mediante la celda colectora modular.

4.1.2.3. Método por asignación de polos

La técnica de asignación de polos es empleada en el diseño y evaluación de sistemas de control, particularmente en aquellos de tipo dinámico.

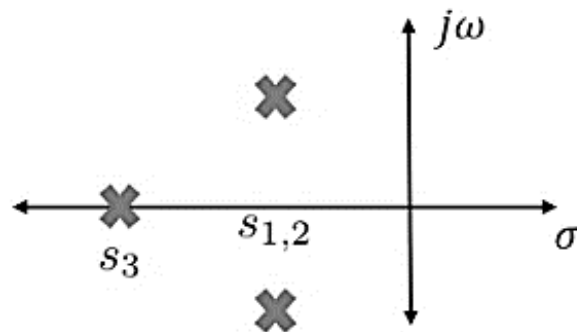
Este enfoque posibilita alterar la posición de los polos dentro del sistema. Para asegurar la estabilidad del sistema, es necesario que los polos se encuentren en el semiplano izquierdo del plano complejo. Si los polos están próximos al eje imaginario, pueden generar una respuesta más lenta o con oscilaciones.

La posición de los polos influye directamente en características de la respuesta transitoria, como el sobreimpulso y el tiempo de asentamiento.

Después de asignar los polos, se verifica si el sistema cumple con los requisitos de estabilidad y desempeño, mediante simulaciones o análisis de la respuesta del sistema como se observa en la figura 89.

Figura 88

Plano complejo, se muestra tres polos en el semiplano de estabilización.



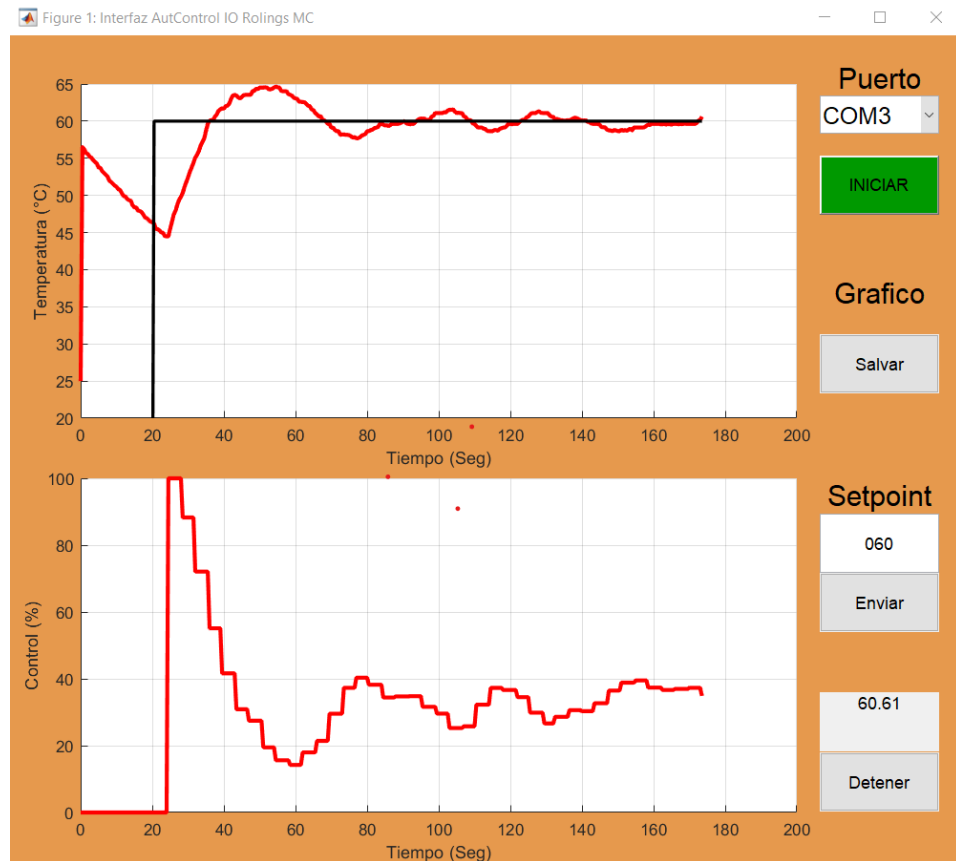
Nota: Ubicación de los polos en el plano complejo s .

Para este caso de control por asignación de polos se diseñó asignar los valores de tiempo de estabilización de 220 segundos, y un máximo de pico de 5%, con los datos se calcula el factor de amortiguamiento para obtener las ganancias del controlador que fueron de: $k_p = 4.633$, $t_i = 43.4$.

En este método con los valores obtenidos se realiza la prueba de control, donde se tiene la respuesta transitoria al aplicar un valor en set-point, el sistema se estabiliza en 180 segundos, y tiene sobreimpulso del 10% en la respuesta de estabilización, se hizo pruebas a diferentes valores y muestra el mismo comportamiento donde no llega a los valores de diseño. En la figura 89 podemos observar el sobreimpulso y las oscilaciones en el tiempo de estabilización según los parámetros que se utilizaron para el controlador proporcional integral que se obtuvo al momento de realizar pruebas de control de la celda colectora modular. Donde el control cumple con el tiempo de estabilización del proceso, según diseño debería tomar más tiempo, también se observa el sobreimpulso que no es adecuado por que supera los valores de diseño que fue menor al 5%.

Figura 89

Respuesta transitoria del método por asignación de polos



Nota: Se muestra el resultado de la respuesta transitoria del metodo de asignacion de polos se observa el comportamiento de estabilizacion de la planta

Las pruebas realizadas de control para este método se asigna setpoint de 60°C, se aprecia en la figura 89 y se observa la respuesta transitoria con bastante sobre picos en la estabilización de control, por ello se concluye que se requiere mejorar en el diseño del controlador, el método de control no es óptimo para este tipo de proceso.

4.1.3. Para el segundo objetivo específico

La monitorización se centró en evaluar el comportamiento del sistema en condiciones reales durante el día, observando la variación de temperatura interna, el tiempo de respuesta del sistema PID y su adaptación al cambio de la radiación



solar. Donde se implementó un sistema de monitorización en tiempo real que permitió la visualización de datos a través de una interfaz web. Se podrá acceder a la información sobre el comportamiento del sistema, incluyendo temperatura ambiente de la vivienda y temperatura del colector solar.

Los datos recopilados indicaron que el sistema logró mantener temperaturas interiores confortables en la mayoría de los días, sin embargo, durante los días nublados o con baja radiación solar la temperatura disminuyó, lo que resalta la necesidad de sistemas auxiliares o almacenamiento térmico para garantizar el confort térmico continuo.

El sistema de control PID demostró ser efectivo en la regulación de la temperatura del fluido caloportador, respondiendo adecuadamente a las variaciones de la demanda térmica en la vivienda.

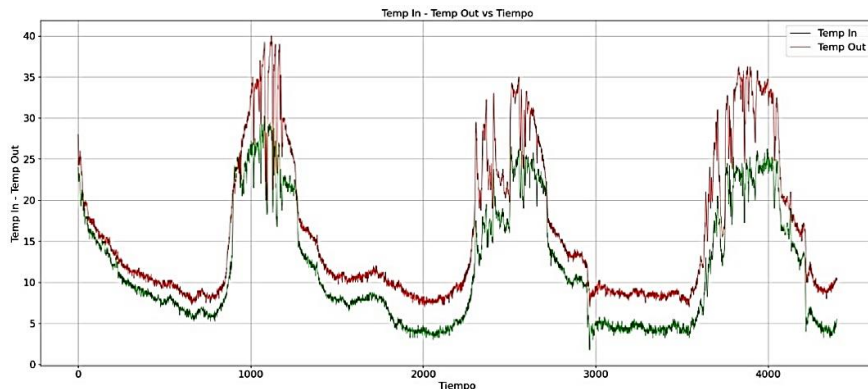
Temp In corresponde a la temperatura medida por el sensor de entrada, el cual está colocado en la parte superior del colector. Temp Out hace referencia a la temperatura registrada por el sensor de salida, ubicado en el conducto por donde el fluido abandona el colector.

La figura 90 ilustra el funcionamiento del sistema en ausencia de control, se puede observar que el colector siempre eleva la temperatura de entrada y la proporciona en la salida.

Es decir, que todo el tiempo está funcionando tratando de elevar la temperatura incluso si ya no es necesario hacerlo. Este análisis se realizó tomando datos del sistema cada minuto y durante tres días aproximadamente con un total de 4398 registros de los sensores que muestran la temperatura.

Figura 90

Monitorización de la temperatura de la celda colectora.

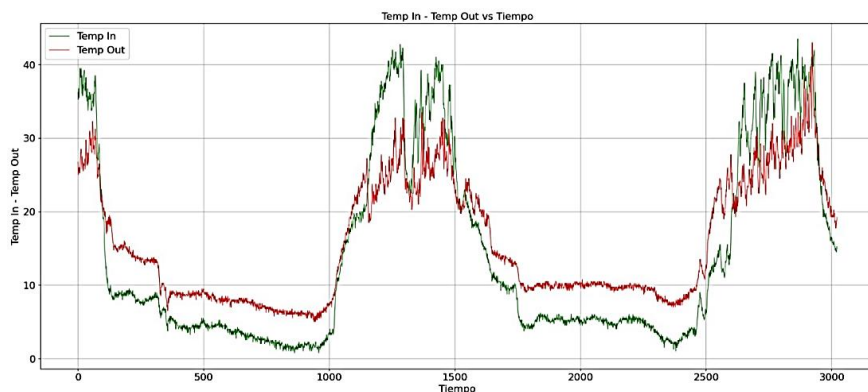


Nota: Se observa el gráfico de la temperatura monitorizada del colector solar.

En la figura 91 muestra el sistema funcionando con un sistema de control PID, se ha establecido un set-point de 19°C y se puede observar que el colector siempre eleva la temperatura de entrada cuando ésta es menor a 19°C para tratar de llegar al set-point en el conducto de salida, y no necesita seguir elevando la temperatura de entrada cuando ésta es igual o mayor a 19°C en el conducto de salida del sistema. Este análisis se realizó tomando datos del sistema cada minuto y durante dos días aproximadamente con un total de 3022 registros de los sensores que muestran la temperatura.

Figura 91

Monitorización con control PID.



Nota: se observa en la imagen la monitorización de calefacción con control PID.

4.1.4. Discusiones

El estudio de Lammardo & Baritto (2010) Se plantea un modelo matemático unidimensional para representar el comportamiento térmico de un colector solar de placa plana, haciendo uso de la ecuación de conservación de la energía y resolviéndolo mediante el método de diferencias finitas. A diferencia de ello, nuestra investigación se centra en el diseño e implementación de un sistema de calefacción residencial con control PID, basado en colectores solares, empleando datos experimentales para modelar el sistema y comparar distintos métodos de sintonización del controlador. Ambos estudios se orientan a la comprensión teórica del fenómeno térmico, mientras que el proyecto aplica dicha comprensión al diseño de un sistema de control eficiente y adaptado al entorno real.

El estudio de Ávila Gómez et al. (2011) se orienta principalmente hacia una evaluación experimental y física del colector solar. Se desarrolla un modelo físico-matemático y se construye un prototipo con elementos básicos como una estructura de madera, doble cubierta de cristal, una placa absorbente y un ventilador para extraer el aire caliente. Su principal objetivo es determinar el comportamiento térmico del colector en condiciones reales, sin un control activo sobre el sistema. En el proyecto de estudio se centra en el control automático del sistema de calefacción, aplicando técnicas de control como el PID, con el fin de mejorar la eficiencia térmica y el confort en viviendas del distrito de Puno. Aquí, además de desarrollar un modelo matemático de la planta mediante datos recolectados con un datalogger, se realiza la identificación de la función de transferencia y se prueban tres métodos de sintonización del controlador PID. En ambos trabajos aportan al desarrollo de tecnologías solares térmicas, destacando



la importancia del control automático para mejorar la eficiencia y el confort térmico.

En el primer estudio (Cabrera Rojas & Sottee Botero, 2019), se plantea una estrategia de control automatizado con una fuerte integración entre el modelado en Simulink y un sistema físico implementado con Arduino Mega. El objetivo principal es mantener la temperatura de salida del colector dentro de un rango específico (60 ± 5 °C), respondiendo dinámicamente a las variaciones ambientales mediante la regulación del flujo de líquido frío o caliente. En el proyecto el enfoque se orienta más hacia la climatización de viviendas a una temperatura de confort de 18°C a 22°C, implementando un sistema de calefacción con control PID. Ambos trabajos desarrollan sistemas de control térmico basados en colectores solares, utilizando modelado en Matlab.

Ambos estudios abordan soluciones de calefacción sustentable (Oliva, 2011) enfatiza la problemática de las bajas temperaturas en zonas altoandinas y la necesidad de sistemas de calefacción eficientes, proponiendo el uso de suelo radiante alimentado por energía solar térmica. Este sistema se destaca por su eficiencia energética y distribución uniforme del calor, aunque presenta limitaciones técnicas en su implementación, como la baja temperatura del agua, que impidió alcanzar la temperatura interior deseada (13°C frente a los 18°C ideales). La principal ventaja del proyecto de tesis es el enfoque que permite un monitoreo y ajuste en tiempo real, logrando una mayor precisión y estabilidad del sistema llegando a calefactar la vivienda con una temperatura de 19°C, también el estudio implementa un sistema de control PID para optimizar colectores solares térmicos, concluyendo que el método de cancelación de polos ofrece mayor eficiencia y estabilidad. Ambos estudios coinciden en el uso de energía solar, pero



difieren en su implementación: uno es estructural y pasivo, el otro tecnológico y activo. La integración de ambos enfoques podría mejorar significativamente la eficiencia y viabilidad de sistemas de calefacción sostenible en zonas altoandinas.

Ambas investigaciones se enfocan en sistemas de calefacción solar térmica, pero abordan el problema desde perspectivas complementarias. El estudio de Mercado & Machaca (2017) presenta una implementación práctica de un sistema dividido en tres subsistemas principales: calentamiento solar de agua, calefacción de espacios y recirculación del fluido caloportador. Por otro lado, el estudio se enfoca en la parte de control y monitoreo del sistema, específicamente utilizando un controlador PID para regular la temperatura del colector solar térmico. Este trabajo es más técnico y se orienta a la modelación matemática y a la simulación en MATLAB para encontrar la mejor estrategia de control, evaluando métodos de sintonización. La relación entre ambos estudios es evidente: mientras uno optimiza la estructura física y la eficiencia energética del sistema, y se optimiza su capacidad de control y respuesta ante cambios térmicos. Juntos, ofrecen una visión integral del diseño e implementación de sistemas de calefacción solar térmica, abarcando desde la parte estructural hasta el control automatizado de temperatura en tiempo real.

El estudio aborda el aprovechamiento de la energía solar térmica para climatizar piscinas, pero desde enfoques técnicos. Rivasplata Cabanillas et al. (2020) se enfoca en el uso de colectores solares de placa plana de polipropileno UV para calefaccionar piscinas, especialmente en regiones del sur del Perú con alta radiación solar. En contraste, el estudio se orienta a la calefacción de viviendas mediante un sistema de colectores solares térmicos controlado por un algoritmo PID. Ambos estudios investigan el uso de colectores solares térmicos



para calefacción, uno en piscinas y otro en viviendas. En conjunto, ambos trabajos muestran distintas estrategias para optimizar el confort térmico mediante energía solar, destacando tanto el diseño pasivo como los sistemas inteligentes de control.

V. CONCLUSIONES

PRIMERA: Los resultados obtenidos en la presente investigación evidenciaron que el diseño y monitorización del sistema de calefacción con control PID basado en colector solar fue esperado, mostrando correlaciones significativas en todos los objetivos planteados. El sistema demostró un funcionamiento estable, eficiente y adaptable al entorno climático del distrito de Puno, mejorando el confort térmico de las viviendas, basado en colector solar modular de placa plana, es una solución viable para mantener temperaturas interiores confortables dentro de los valores de 18°C hasta los 22°C en viviendas del distrito de Puno, contribuyendo al ahorro energético y al bienestar de los habitantes. Los resultados obtenidos respaldan la viabilidad de esta tecnología como una solución sostenible para las necesidades de calefacción en la región de Puno.

SEGUNDA: El diseño del sistema de calefacción modular de la celda coollectora, para controlar y monitorizar los cambios. Para ello se desarrolló una datalogger para la obtención de temperatura durante un día, con los datos obtenidos se realiza la estimación mediante el software de Matlab para obtener el modelo matemático de la planta o celda coollectora, obteniendo una estimación del 95.55% de similitud. Con el comando system Identification de Matlab, se obtiene la función de transferencia de la planta, con la cual se realiza la sintonía de control PID del proceso de calefacción, desarrollando tres métodos de control proporcional integral y derivativo. En la sintonía de Ziegler-Nichols los resultados que obtuvimos fueron poco satisfactorios donde no se llega a controlar eficientemente en un



determinado tiempo, se demora mucho más a los valores de diseño, al introducir un set-point con valores diferentes, el tiempo de respuesta no es lo adecuado según el diseño. Para el segundo método de sintonización por Cancelación de Polos fue el más eficiente al momento de controlar el proceso de calefacción, donde se observó los tiempos de respuesta de manera rápida y con mejor estabilidad, se ingresa valores en set-point a diferentes temperaturas de 18°C hasta 22°C y las respuestas de controlabilidad respondieron como se diseñó el controlador por ello se recomienda emplear este método de control. En el método de asignación de polos se obtuvo resultados de control menos eficiente para esta planta ya que con las perturbaciones o cambios en el set-point el control tarda mucho más tiempo en estabilizarse, en cambios bruscos tiende a la inestabilidad del proceso por ello no se recomienda el uso para la planta o proceso.

TERCERA: Se logró la monitorización del sistema de calefacción con control PID del colector solar para viviendas en el distrito de Puno, donde se implementó con dispositivos electrónicos como dos sensores de temperatura, Arduino uno que procesa los datos de temperatura de los sensores y los procesa a datos digitales, el ethershield se encarga de enviar los datos hacia la plataforma web y el raspberry pi trabaja como router para permitir que llegue los datos que procesa el dispositivo ethershield. De esta forma se implementó la monitorización de temperatura del colector solar modular, mediante la plataforma de monitoreo se observa los cambios de temperatura de la celda colectora modular y la habitación calefactada que toma muestras cada ocho segundos en el transcurso del día para así poder



obtener una información en tiempo real de los cambios de temperatura de calefacción de la vivienda del distrito de puno.



VI. RECOMENDACIONES

- PRIMERA:** Para futuras investigaciones, se recomienda realizar un almacenamiento de la energía solar térmica, ya que en esta investigación solo se tomó durante el día la calefacción en las viviendas del distrito de puno.
- SEGUNDA:** Además, sería útil evaluar el comportamiento del cambio de temperatura durante un año calendario, con los datos obtenidos de la monitorización de la celda colectora, para así poder tomar mejoras en la implementación y autonomía que debe tener para el confort térmico en otras aplicaciones como escuelas colegios piscinas y otros.
- TERCERA:** También se recomienda enfocarse en utilizar energías renovables como los paneles solares para el control de la celda colectora, así mejorar su autonomía de la dependencia de la energía convencional.
- CUARTA:** Para controles robustos es necesario la implementación del control con autómatas programables y variador de velocidad para control de la velocidad de la ventiladora ya que se tiene los parámetros de ganancia PID.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Gómez, A. E., Mendoza Fandiño, J. M., & Beltrán Sarmiento, J. F. (2010). *Evaluación Ávila energética de un colector solar de placa plana de doble cubierta*. Ingeniería & Desarrollo, 27(0122–3461), 93–112. <http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/viewArticle/869>
- Báez Matos, J. F., Jiménez Rodríguez, R. A., & Gutiérrez Toledo, D. R. (2018). *Matlab/Simulink: modelos para simular mediciones eléctricas en circuitos r, rl y rlc monofásicos*. Roca: Revista Científico - Educaciones de La Provincia de Granma, 14(2)102–115. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6759655&info=resumen&idioma=ENG%0Ahttps://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6759655&info=resumen&idioma=SPA%0Ahttps://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6759655>
- Behar, D. (2008). *Metodología de la Investigación* (A. Rubeira (ed.); Shalom 200). 2008.
- Bernhard, R., Laabs, H., & Lalaing, J. De. (2008). *Linear Fresnel collector demonstration on the PSA*, Part I–design, construction and quality control. *SolarPaces ...*, 1–10. http://www.researchgate.net/publication/225000351_Linear_Fresnel_Collector_Demonstration_on_the_PSA_Part_I__Design_Construction_and_Quality_Control/file/60b7d515e950a285ce.pdf
- Cabrera Rojas, B. R., & Sotter Botero, J. H. (2019). *desarrollo de un sistema de control para colectores de placa plana con mira a su aprovechamiento en procesos de deshidratación en frutas y verduras*.
- Carrión-Chamba, W., Murillo-Torres, W., & Montero-Izquierdo, A. (2022). *Una revisión de los últimos avances de los colectores solares térmicos aplicados en la industria*. *Ingenius*, 2022(27), 59–73. <https://doi.org/10.17163/ings.n27.2022.06>
- Casado fernandez, C. (n.d.). *Manual básico de Matlab*.
- Echevarria, A. (2011). *Diseño de un colector cilindro parabólico compuesto con aplicación para el calentamiento de agua*. 152.
- Garcia Jaimes, L. E. (2009). *Control digital teoría y practica* (segunda Ed).



- González Coneo, J., Nuñez Pérez, B., & Vilorio Molinares, P. (2012). *Sistema de monitoreo en tiempo real para la medición de temperatura*. Scientia Et Technica, XVII(50), 128–131. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84923878019>
- Guzman Bravo, F., & Ochoa de la Torre, J. M. (2014). *Confort térmico en los espacios públicos urbanos Clima cálido y frío semi-seco*. Revista Hábitat Sustentable, 4(2), 52–63.
- Kuo, B. (1996). *Sistemas de control automático* (Septima Edi). Prentice-Hall.
- La, R., & Acad, S. (2012). *Revista la sociedad académica, núm. 39*. 39, 1–371.
- Lammardo, A., & Baritto, M. (2010). *Modelo matemático del comportamiento térmico de un colector solar de placas planas inclinadas para calentamiento de aire*. 17.
- Mercado, E., & Machaca, H. (2017). *Sistema de calefacción solar térmico controlado para mantener el confort térmico en un ambiente de la FIQ*. Repositorio de La UNAP, 127.
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. (2006). Decreto Supremo N° 011-2006-VIVIENDA *Reglamento nacional de edificaciones*. Sencico, Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 1–439.
- Monk, S. (2012). *Programming Arduino: Getting Started with Sketches*. McGraw-Hill Education. McGraw-Hill Education.
- Moreno, M. (2001). *Apuntes de control pid*. Universidad Mayor De San Andres La Paz – Bolivia, 10–22. <https://www.mdpi.com/2079-9292/12/1/28>
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. In Pearson.
- Olivera Olivia, D. A. (2011). *diseño energético de un suelo radiante para una sala de 12 m² ubicada a 4000 msnm en langui cuzco*.
- Panaroni, D., Castro Luna, A., & Martorelli, L. (2021). *Análisis y evaluación de la eficiencia de un colector cilindro parabólico solar: Aplicación en una región subtropical de Argentina*. ACI Avances En Ciencias e Ingenierías, 13(2), 15. <https://doi.org/10.18272/aci.v13i2.2283>
- Paz, M. A., Ramírez-del Real, T. A., Garibo, S. C., & Gallegos, J. L. (2013). *Algoritmo*



- didáctico para la asignación implícita de polos mediante la especificación de características temporales deseadas usando controladores PI industriales. Formación Universitaria*, 6(6), 23–40. <https://doi.org/10.4067/S0718-50062013000600004>
- Pineda Medina, J. G. (2014). *Modificación, evaluación y análisis de eficiencia de un colector solar plano comercial. Journal of Chemical Information and Modeling*, 53, 160.
- Rivasplata Cabanillas, C. E., Estalla Llanque, F. J., Coaquira Miranda, E. E., Arias Santana, V. A., & Mena Ordoñez, S. S. (2020). *Data experimental en la calefacción solar de una piscina cerrada con envoltente de policarbonato*, 39–42. <https://doi.org/10.21754/tecnia.v30i1.855>
- Roldán Serrano, M. I. (2013). *Diseño y análisis térmico de un sistema receptor volumétrico para un horno solar de alta temperatura*.
- Ruzafa, O., & Lopez, M. (2009). *La energía solar en la edificación: la energía solar térmica y la energía solar fotovoltaica*. Escuela Universitaria Ingeniería Técnica Civil, 1–337.
- Sampieri Hernandez, R. (2016). *Metodología de la investigación. In Revista de enfermería (Barcelona, Spain) (Vol. 39, Issue 2)*.
- Sucasaire Pilco, J. (2021). *Estadística descriptiva para trabajos de investigación*. In J. Sucasaire Pilco (Ed.), *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952. (Primera Ed, p. 244). El Agustino.
- Varela Montoya, M., Ramírez Duque, J. L., & Vidal Lara, J. A. (2023). *Evaluación de parámetros constructivos y arquitectónicos que influyen en el confort térmico de viviendas de interés social*. 1–10. <https://doi.org/10.26507/paper.3283>

ANEXOS

Anexo 1: Diseño de la celda colectora de energía térmica solar.

Fabricación y montaje de celda colectora modular de energía térmica solar.



Nota: la fotografía muestra el diseño e implementación del prototipo de la celda colectora modular, que se empleara en el proyecto de investigación.

Una de la celda colectora modular.



Nota: se observa en la fotografía el proceso de pintado de las celdas, con pintura negra de pizarra para una mejor absorción de la radiación solar.

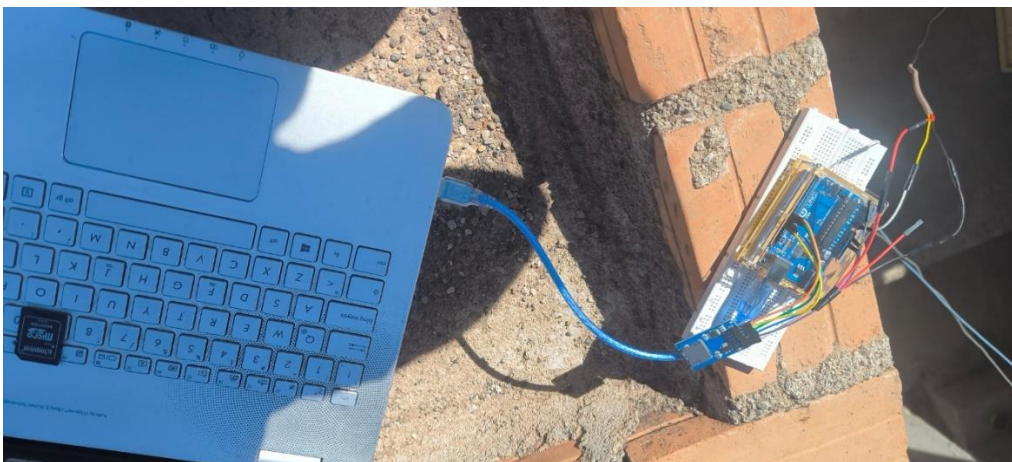
Montaje en campo del colector solar modular.



Nota: la fotografía muestra el módulo del colector solar implementado, que está instalada listo para la obtención de los datos de temperatura.

Anexo 2: Obtención de datos de temperatura mediante datalogger.

Implementación de datalogger.



Nota: fotografía tomada muestra la implementación del datalogger para la obtención de datos de temperatura del colector solar modular.

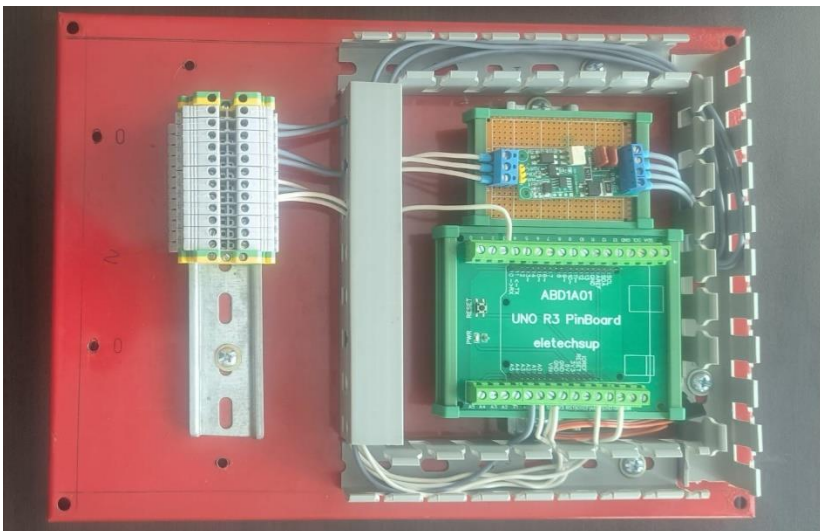
Instalación del datalogger.



Nota: se observa la implementación del datalogger utilizando Arduino uno, sensor de temperatura LM35 y una memoria SD para su almacenamiento de los datos.

Anexo 3: Implementación del controlador proporcional integral derivativo (PID).

Diseño del tablero de control PID.



Nota: fotografía tomada muestra la implementación del circuito de control y potencia, que controlara la calefacción de vivienda.

Montaje y conexionado del circuito de control y potencia para el control PID.



Nota: Se aprecia en la fotografía la implementación del controlador PID, instalada en campo que esta lista para las pruebas necesarias de controlabilidad.

Anexo 4: Implementación del monitoreo de la celda colectora de energía térmica solar.

Implementación de monitoreo para el colector solar modular.



Nota: en la fotografía tomada se observa la implementación de monitoreo, se utilizó dos sensores de temperatura termocupla, Arduino uno, shield ethernet y raspberry como router que envía a la nube los datos de monitoreo del colector solar y la calefacción de la habitación.

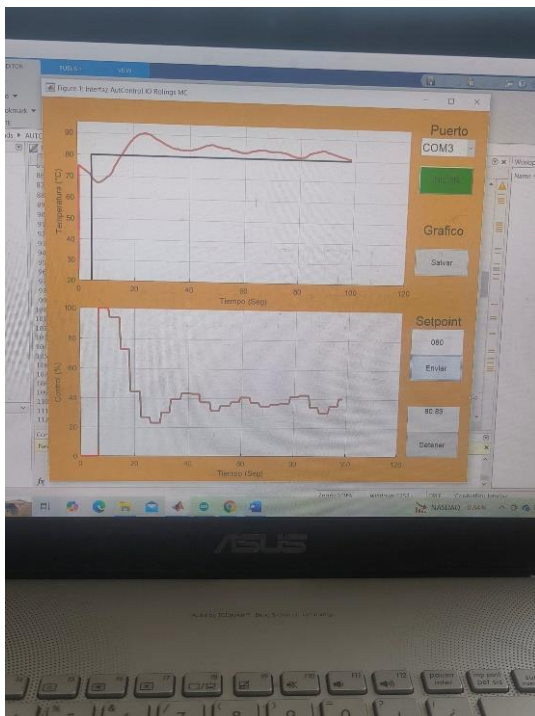
Pruebas de monitoreo del colector solar modular.



Nota: fotografía tomada muestra las pruebas de implementación y monitorización del colector solar, uno de los sensores de temperatura está instalada dentro del colector solar y la otra que está ubicado en la habitación.

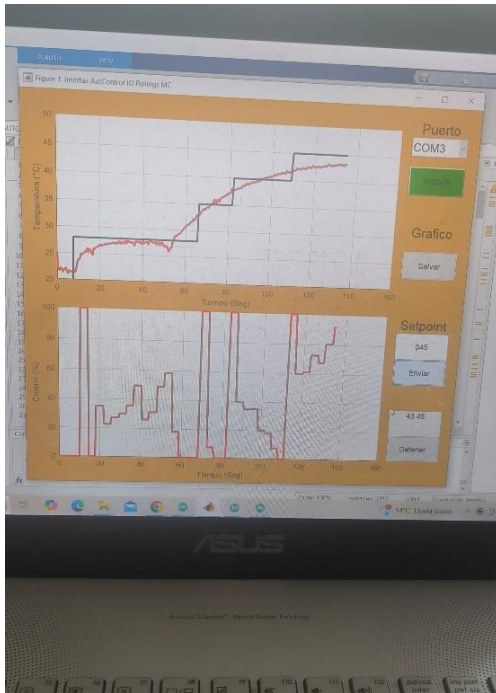
Anexo 5: Desarrollo de pruebas de control y monitoreo en la celda colectora.

Control PID y monitorización de la planta o colector solar modular.



Nota: la fotografía muestra la implementación del control PID, mediante el método de Ziegler-Nichols y la monitorización de los cambios que realiza al aplicar un set-point de 80 °C.

Pruebas de controlabilidad a diferentes set-point.



Nota: la fotografía tomada muestra los cambios a diferentes temperaturas de control PID, aplicando el método de cancelación de polos, donde se observa un control eficiente.

Desarrollo de las pruebas en campo.



Nota: se muestra en la fotografía tomada al tesista con la implementación del monitoreo y control PID de la planta o colector solar modular.

Anexo 6: Código de la datalogger para la obtención de datos de temperatura.

```
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#define SS 10
File archivo;
```



```
float celsius;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Inicializar targeta...");
  if(!SD.begin(SS)) {
    Serial.println("fallo en inicializacion !");
  }
  else{
    archivo = SD.open("temp.txt", FILE_WRITE);
    Serial.println("Inicializacion correcta");
  }
}

void loop() {
  int valor = analogRead(A0);
  celsius = ((valor * 5.0) / 1023) * 100;
  Serial.print(celsius);
  registrasd();
}

void registrasd(){
  archivo = SD.open("temp.txt", FILE_WRITE);
  if (archivo) {
    float celsius2 = float (celsius);
    archivo.println(celsius2);
    Serial.println(" C");
    delay(500);
    archivo.close();
    delay(30000);
  }else {
    Serial.println("Error en apertura de Archivo");
    delay(10000);
  }
}
```

Anexo 7: Código de control PID para los tres métodos de sintonización

```
#include <TimerOne.h> // Definiciones componentes de la
                        tarjeta
#define sensor1 A0 // LM 35
#define heater1 3 // PWM DIMMER
// Variables Globales //
float T1,aux; // Temperatura del Heater 1
float r1=0.0; // Referencia del Heater 1
volatile float u=0.0,u_1=0.0; // Acción de Control
byte Ts = 8; //Periodo de muestreo // Parámetros del PID
float kp,ti,td;
volatile float q0,q1,q2;
volatile float e=0.0,e_1=0.0,e_2=0.0;

float k=1.04,tau=160,theta=10+Ts/2; //Parámetros del Modelo del
sistema
float Tlc,eps,Wn,P1,P2,tau_d; //Parámetros del diseño por
asignación de polos
String dato;
bool Matlab = true; // 0: Usa el Serial Plotter; 1:
Usa la interfaz de Matlab
/* Tipo de Control:
* 1: Control por Asignación de Polos
* 2: Control por Cancelamiento de polos
```



```
* 3: Control por Ziegler y Nichols
*/
byte type = 2;
/*=====FUNCION DEL CONTROL
   PID =====*/
void PID(void)
{
    e=(r1-T1);
                                // Controle PID
    u = u_1 + q0*e + q1*e_1 + q2*e_2; //Ley del controlador PID
    discreto

    if (u >= 100.0)                //Saturo la accion de control 'uT' en un
        tope maximo y minimo
        u = 100.0;

    if (u <= 0.0 || r1==0)
        u = 0.0;

                                //Retorno a los valores reales
    e_2=e_1;
    e_1=e;
    u_1=u;

                                //La accion calculada la transformo en
    PWM

    analogWrite(heater1,map(u, 0,100, 0,255));
}

                                //Función del Periodo de Muestreo (Timer
    1)
void SampleTime(void)
{
    digitalWrite(hot, !digitalRead(hot)); //Led
    PID();
}
void setup() {
    pinMode(hot,OUTPUT);           //Led Indicator
    digitalWrite(hot,LOW);
    analogReference (EXTERNAL); //Referencia analógica PIN AREF (3,3v)
    //Configuramos el puerto serial
    Serial.begin(9600);
    //Espera 10 segundos en Stand by cuando es energizado la primera
    vez
    if(!Matlab){
        delay(10000);
        r1=19.0;
    }

                                //Valor máximo del Timer es 8.3 Segundos
    Timer1.initialize(8000000); //Configura el TIMER en 8 Segundos
    Timer1.attachInterrupt(SampleTime) ; //Configura la interrupción del
    Timer 1

    switch (type){

    case 1:
    //*****METODO DE CONTROL 1*****//

    Tlc=200.0;                    //Tiempo de establecimiento en Lazo
    Cerrado
    eps = 0.6901;                 //Factor de Amortiguamiento
    Wn=4.0/(eps*Tlc);             //Frecuencia natural del sistema
}
```



```
//Ubicación de 2 Polos
P1=2.0*eps*Wn;
P2=Wn*Wn;

kp=(P1*tau-1.0)/k;           //Calculo de Kc
ti=(k*kp)/(P2*tau);        //Calculo de ti
td=0.0;
break;

case 2:
//*****METODO DE CONTROL 2*****//

tau_d=45.0;                 //Constante de Tiempo Deseada
kp=(tau)/(tau_d*k);        //Calculo de Kc
ti=tau;                     //Calculo de Ti (Igual a la constante de
    tiempo)
td=0;
break;

case 3:
//*****METODO DE CONTROL 3*****//

kp=(1.2*tau)/(k*theta);
ti=2.0*theta;
td=0.5*theta;
break;
}

//*****CONTRO PID DIGITAL*****//

q0=kp*(1+Ts/(2.0*ti)+td/Ts);
q1=-kp*(1-Ts/(2.0*ti)+(2.0*td)/Ts);
q2=(kp*td)/Ts;
}
void loop() {
    int i,ini=0,fin=0;
    String degC;

                                //Filtro de promedio movil en la lectura
        ADC
    aux=0;
    for(i=0;i<10;i++){
        aux = aux + (float(analogRead(sensor1))*5.0/1023.0)/0.01; //TMP35
        //delay(5);
    }
    T1 = aux/10.0;

    if(Matlab){ //Usar la interfaz de Matlab

//*****INTERFAZ DE
        ARDUINO*****//

        Serial.print("I");
        Serial.print(T1);
        Serial.print("F");
        Serial.print("I");
        Serial.print(T1);
        Serial.print("F");
        Serial.print("C");
        Serial.print(u);
        Serial.print("R");
    }
}
```



```
        Serial.print("C");  
        Serial.print(u);  
        Serial.print("R");  
    }  
    else{ //Usar el Serial Plotter  
        Serial.println("Temperatura_1,Setpoint_1");  
        Serial.print(T1);  
        Serial.print(",");  
        Serial.println(r1);  
    }  
    delay(1000);  
}
```

Anexo 8: Código para la monitorización del control PID del colector solar modular.

```
#include <SPI.h>  
#include <Ethernet.h>  
#include "max6675.h"  
int thermoDO_1 = 3;  
int thermoCS_1 = 4;  
int thermoCLK_1 = 5;  
int thermoDO_2 = 6;  
int thermoCS_2 = 7;  
int thermoCLK_2 = 8;  
float temp1 = 0;  
float temp2 = 0;  
  
MAX6675 thermocouple_1(thermoCLK_1, thermoCS_1, thermoDO_1);  
MAX6675 thermocouple_2(thermoCLK_2, thermoCS_2, thermoDO_2);  
  
//byte mac[] = { 0xDE, 0xAD, 0xBE, 0xEF, 0xFE, 0xEE };  
byte mac[] = { 0x54, 0xAB, 0x3A, 0x5B, 0xAD, 0x05 };  
//char server[] = "ecc-ingenieros.com";  
//IPAddress server(23,82,16,187);  
IPAddress server(108,62,123,70);  
  
IPAddress ip(172,16,100,133);  
//IPAddress ip(192,168,1,133);  
byte gateway[] = { 172, 16, 100, 1 };  
//byte gateway[] = { 192, 168, 1, 1 };  
byte subnet[] = { 255, 255, 255, 0 };  
//byte myDns[] = { 192, 168, 1, 252 };  
//byte myDns[] = { 190, 113, 220, 18};  
byte myDns[] = { 8, 8, 8, 8 };  
  
EthernetClient client;  
bool printWebData = true;  
char sensor_id[] = "ROLIN-01";  
void setup(){  
    Ethernet.begin(mac, ip, myDns, gateway, subnet);  
    //Serial.begin(9600);  
    //while (!Serial) {  
    //}  
    delay(500);  
}  
void loop(){  
    delay(1000);  
  
    temp1 = thermocouple_1.readCelsius();  
    temp2 = thermocouple_2.readCelsius();  
  
    //Serial.print("Temperatura: ");
```



```
//Serial.print(temp_prom);  
//Serial.println("*C");  
  
if (client.connect(server, 80)) {  
  
    client.print("GET /TEMPTERM/formaction_tempterm.php?temp1=");  
    client.print(temp1);  
    client.print("&temp2=");  
    client.print(temp2);  
    client.print("&sensor_id=");  
    client.print(sensor_id);  
    client.println(" HTTP/1.1");  
    client.print("Host: ");  
    client.println(server);  
    client.println("Connection: close");  
    client.println();  
  
} else {  
  
}  
  
while (client.connected()) {  
    int len = client.available();  
    if (len > 0) {  
        byte buffer[80];  
        if (len > 80) len = 80;  
        client.read(buffer, len);  
        if (printWebData) {  
            }  
        }  
    }  
}  
if (!client.connected()) {  
    client.stop();  
    delay(58358);  
}  
}
```



Anexo 9: Declaración jurada de autenticidad de tesis



Universidad Nacional
del Altiplano Puno



Vicerrectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Roling Leomar Mamani Canahuiri
identificado con DNI 46150714 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
INGENIERÍA ELECTRÓNICA

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

"DISEÑO Y MONITORIZACIÓN DE UN SISTEMA DE CALEFACCIÓN CON CONTROL PID BASADO EN COLECTOR SOLAR PARA VIVIENDAS EN EL DISTRITO DE PUNO"

Es un tema original.

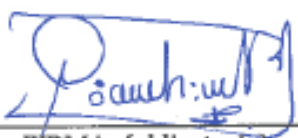
Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y no existe plagio/copia de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 10 de Junio del 2025


FIRMA (obligatoria)



Huella



Anexo 10: Autorización para el depósito de tesis o trabajo de investigación con el repositorio institucional



Universidad Nacional
del Altiplano Puno



Vicerrectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo Rolando Icomar Mamani Canahuiri,
identificado con DNI 46150714 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA ELECTRÓNICA

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

"DISEÑO Y MONITORIZACIÓN DE UN SISTEMA DE CALEFACCIÓN CON CONTROL PID BASADO EN COLECTOR SOLAR PARA VIVIENDAS EN EL DISTRITO DE PUNO"

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 10 de Junio del 2025



FIRMA (obligatoria)



Huella