UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**Desarrollo, construcción e implementación de un cuarto húmedo para el
curado de probetas de concreto**

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Electrónico

AUTORES

Ampudia Tovar, Alejandro Edson Almir (0000-0002-7599-8560)

Serpa Pinillos, Manuel Alfonso (0000-0002-4634-0727)

ASESOR

Gutiérrez Chávez, Moisés Ricardo (0000-0003-2517-2792)

Lima, 05 de Marzo de 2019

Dedicatoria:

El presente trabajo de investigación lo dedico con mucho cariño a mis padres, esposa y a mi hija Antonella, quienes aportaron positivamente a lo largo de mi formación profesional dándome el apoyo y la motivación necesaria para trabajar día a día, ellos son los testigos del trabajo perseverante que me impulsa para lograr nuevos éxitos en mi vida. Por eso y por mucho más les dedico este proceso de formación que constituirá un nuevo logro en mi vida profesional y a través del cual forjare un nuevo presente en las labores que desempeñemos todos los días.

Manuel Serpa Pinillos.

El presente trabajo de investigación es dedicado a mi madre, abuelos, tíos y hermanos por haberme brindado su apoyo incondicional a lo largo de toda mi carrera universitaria y a mi nueva familia la cual está conformada por mi futura esposa Tatiana y mi hija Amy Aitana debido a que se han convertido en mi mayor estímulo para crecer a nivel personal, familiar y profesional y poder construir un futuro mejor lleno de amor, satisfacciones y alegrías lo cual logrará que tengamos una vida plena uno al lado del otro.

Alejandro Ampudia Tovar.

RESUMEN

En la presente tesis se desarrolla, construye e implementa un cuarto húmedo para el curado de probetas de concreto el cual obvia las condiciones climáticas del medio a través de un sistema automatizado que permite acondicionar un ambiente óptimo de curado a través de la integración de dispositivos electrónicos como sensores y actuadores. La tesis permite contrastar los resultados de las pruebas de la resistencia a la compresión que se obtienen de las probetas curadas dentro del cuarto húmedo versus los resultados adquiridos de las probetas curadas en una poza llena de agua, de manera rudimentaria, en donde los factores climatológicos interfieren directamente sobre el producto final.

Se analiza el marco teórico necesario que permita asimilar nuevos conceptos y así comprender los eventos involucrados en el proceso de curado del concreto. Por otro lado, se pone en práctica conocimientos matemáticos y científicos con la finalidad de describir y entender la solución propuesta a lo largo de este documento.

Por último, se describe el proceso tecnológico ejecutado para poner en marcha la solución planteada. Es decir, se analiza a detalle el hardware y software desarrollado junto a una serie de subsistemas específicos que forman parte del proceso.

Palabras clave: cuarto húmedo; curado del concreto; sistema automatizado; dispositivos electrónicos; resistencia a la compresión.

Development, construction and implementation of a wet room for the curing of concrete specimens

ABSTRACT

In this thesis develops, builds and implements a wet room for the curing of concrete specimens which obviates the climatic conditions of the environment through an automated system that allows conditioning an optimal curing environment through the integration of electronic devices as sensors and actuators. The thesis allows to contrast the results of the tests of the compressive strength that are obtained from the cured samples inside the wet room versus the results obtained from the cured samples in a waterhole, in a rudimentary way, where the climatological factors interfere directly on the final product.

The theoretical framework necessary to assimilate new concepts and thus understand the events involved in the concrete curing process is analyzed. On the other hand, mathematical and scientific knowledge are put into practice in order to describe and understand the solution proposed throughout this document.

Finally, the technological process executed to start the proposed solution is described. That is, the hardware and software developed together with a series of specific subsystems that are part of the process are analyzed in detail.

Keywords: wet room; curing of concrete; automated system; electronic devices; compressive strength.

ÍNDICE

Contenido.....	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. Introducción	2
1.1 Planteamiento del problema.....	2
1.2 Ventajas y desventajas	2
1.2.1 Ventajas	2
1.2.2 Desventajas	3
1.3 Justificación	3
1.4 Estado del arte	4
1.4.1 Reseña histórica	4
1.4.2 Antecedentes.....	6
1.4.3 Situación actual del Perú	6
1.5 Aplicaciones.....	6
1.6 Objetivos	6
1.6.1 Objetivo general	6
1.6.2 Objetivos específicos	7
CAPÍTULO II. Marco teórico	8
2.1 Curado del concreto	8
2.1.1 Método de curado: Rociado.....	8
2.1.2 Hidratación del cemento	9
2.1.3 Resistencia a la compresión.....	10
2.1.4 Clima cálido vs Clima frío	12
2.1.5 Tiempo de curado	13
2.1.6 Composición del cemento	14
2.2 Modelo matemático del sistema.....	14
2.2.1 Función de transferencia del control PI (G1)	16
2.2.2 Función de transferencia de la fase de tensión AC (G2)	16
2.2.3 Flujo de calor producido por la resistencia (G3)	18
2.2.4 Calor en un horno (G4).....	19
2.2.5 Función de transferencia final (G).....	19
2.2.6 Potencia disipada	19

2.2.7 Nueva función de transferencia (G)	20
2.2.8 Función de transferencia en lazo cerrado (FT)	21
2.3 Investigación teórica de reguladores de control.....	22
2.3.1 Controlador PID	24
2.3.2 Métodos clásicos de ajuste Ziegler-Nichols para controladores PID	26
2.3.2.1 El método de oscilación.....	27
2.3.2.2 El método de la curva de reacción.....	28
CAPÍTULO III. Descripción de la etapa de hardware	30
3.1 Descripción del Hardware.....	30
3.2 Funcionamiento del Sistema	30
3.3 Diagrama de bloques del Sistema	31
3.3.1 Diagrama de bloques del Control de Temperatura	31
3.3.1.1 Diagrama de bloques cuando la temperatura sea menor a 23°C	31
3.3.1.1.1 Diagrama de interface para el control del TRIAC	33
3.3.1.1.2 Diagrama del bloque de acondicionamiento de señal.....	34
3.3.1.2 Diagrama de bloques cuando la temperatura sea mayor a 24°C	35
3.3.2 Control de bloques del Control de Humedad	36
3.4 Diseño del Hardware.....	37
3.4.1 Diseño de la estructura del cuarto húmedo.....	37
3.4.2 Diseño del tablero eléctrico	40
3.4.3 Diseño del circuito de tuberías	42
3.4.4 Cuarto húmedo ensamblado	43
3.5 Instrumentación.....	44
3.5.1 Sensores	44
3.5.1.1 Descriptores de un Sensor	44
3.5.1.1.1 Descriptores estáticos de un sensor.....	44
3.5.1.1.2 Descriptores dinámicos de un sensor	45
3.5.1.2 Sensores utilizados en la tesis	46
3.5.1.2.1 Sensor de temperatura PT100	47
3.5.1.2.1.1 Ventajas del PT100	47
3.5.1.2.1.2 Conexión del PT100	48
3.5.1.2.2 Sensor de humedad HONEYWELL HIH-4030.....	49
3.5.2 Actuadores	51

3.5.2.1 Actuadores utilizados en la tesis	51
3.5.2.1.1 Resistencia de nicrom	51
3.5.2.1.1.1 Características del tubo de porcelana	52
3.5.2.1.1.2 Características del alambre de nicrom en espiral	52
3.5.2.1.2 Sistema de enfriamiento	53
3.5.2.1.3 Electrobomba periférica	54
3.5.3 Instrumentación Adicional	55
3.5.3.1 Interruptor termomagnético	55
3.5.3.2 Contactor	55
3.5.3.3 Relé	56
3.5.3.4 Transmisor de Temperatura TxRail 4-20 mA	57
3.5.3.5 Bloque terminal	60
3.5.3.6 Fuente de alimentación	60
3.6 Controladores	61
3.6.1 Controlador Lógico Programable (PLC)	61
3.6.1.1 PLC SIEMENS S7-300	63
3.6.1.1.1 Estructura externa	65
3.6.1.1.2 Estructura interna	65
3.6.1.1.2.1 Bloque de entradas	66
3.6.1.1.2.2 Bloque de salidas	66
3.6.1.1.2.3 Unidad Central de Procesamiento (CPU)	66
3.6.1.1.2.4 Fuente de alimentación	66
3.6.1.1.2.5 Interfaces	66
3.7 La PC	66
3.7.1 Unidad Central	67
3.7.2 Comunicación	68
CAPÍTULO IV. Descripción de la etapa de software	71
4.1 Descripción del entorno del software	71
4.1.1 TIA Portal	71
4.1.2 SIMATIC Step 7	72
4.1.3 SIMATIC WinCC	73
4.2 Desarrollo de la solución	73
4.2.1 Diagrama de flujo y tiempo	74

4.2.1.1 Creación del proyecto	76
4.2.1.2 Configuración del hardware	77
4.2.1.3 Conexión en red de los dispositivos	85
4.2.1.4 Programación del controlador	86
4.2.1.4.1 Segmento 1 OB1	86
4.2.1.4.2 Segmento 2 OB1	88
4.2.1.4.3 Segmento 3 OB1	89
4.2.1.4.4 Segmento 4 OB1	90
4.2.1.4.5 Segmento 5 OB1	91
4.2.1.4.6 Segmento 6 OB1	92
4.2.1.4.7 Segmento 1 OB35	94
4.2.1.5 Configuración de la visualización	96
4.2.1.6 Carga de datos de configuración.....	98
4.2.1.7 Uso de funciones online y diagnóstico	101
CAPÍTULO V. Pruebas, resultados y validación	103
5.1 Método de validación.....	103
5.2 Pruebas y resultados.....	105
5.2.1 Prueba de resistencia a la compresión 7 días de curado	105
5.2.2 Prueba de resistencia a la compresión 14 días de curado	106
5.2.3 Prueba de resistencia a la compresión 26 días de curado	106
CONCLUSIONES	110
RECOMENDACIONES	112
BIBLIOGRAFÍA	113
ANEXOS.....	117
Elaboración de las probetas de concreto	117
Pruebas con el sensor de humedad.....	122
Desarrollo del control PI.....	123
Costos.....	125
Informes de laboratorio	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido.....	Pág.
Figura 2. 1. Hidratación de la partícula de cemento.	9
Figura 2. 2. Representación esquemática de la hidratación del cemento.	10
Figura 2. 3. Resistencia a la compresión de cilindros de 15x30 cm en función de los días y condiciones de curado.	11
Figura 2. 4. Efecto de las condiciones de temperatura en el desarrollo de resistencia del concreto.	12
Figura 2. 5. Tiempos de curado mínimo recomendables de acuerdo con la temperatura y la humedad relativa del medio ambiente.	13
Figura 2. 6. Diagrama de bloques de lazo de control.	15
Figura 2. 7. Linealización de corriente eficaz en función del ángulo de disparo.	17
Figura 2. 8. Linealización de la potencia en función del ángulo de disparo.	20
Figura 2. 9. Diagrama de bloques de Control de Lazo Cerrado.	22
Figura 2. 10. Control manual.	22
Figura 2. 11. Diagrama de bloques de control manual.	23
Figura 2. 12. Señales en el diagrama de bloques.	23
Figura 2. 13. Diagrama de bloques desde el punto de vista del controlador.	23
Figura 2. 14. Lazo cerrado con control PID.	24
Figura 2. 15. Control P.	24
Figura 2. 16. Control PI.	25
Figura 2. 17. Control PID.	26
Figura 2. 18. Lazo cerrado solo con ganancia proporcional.	27
Figura 2. 19. Respuesta de la planta con ganancia crítica.	28
Figura 2. 20. Respuesta al escalón de la planta.	29
Figura 3. 1. Diagrama de bloques del control de temperatura cuando esta sea menor a 23°C.	32
Figura 3. 2. Forma de onda de $c(t)$	33
Figura 3. 3. Diagrama de bloques de la interface de control del TRIAC.	33
Figura 3. 4. Diagrama de bloques del acondicionamiento de la señal.	34
Figura 3. 5. Circuito utilizado para el Control de temperatura.	35
Figura 3. 6. Diagrama de bloques del control de temperatura cuando esta sea mayor a 24°C.	36
Figura 3. 7. Diagrama de bloques del control de humedad.	37
Figura 3. 8. Vista Frontal del cuarto húmedo.	38
Figura 3. 9. Vista transversal frontal del cuarto húmedo.	38
Figura 3. 10. Vista transversal lateral derecha del cuarto húmedo.	39
Figura 3. 11. Vista superior del cuarto húmedo.	39
Figura 3. 12. Diseño del tablero eléctrico y distribución de los componentes eléctricos.	40

Figura 3. 13. Diagrama eléctrico de los componentes del tablero eléctrico.	41
Figura 3. 14. Circuito de tuberías para el paso de agua que se utilizará en el control de la humedad relativa dentro del cuarto húmedo.	42
Figura 3. 15. Imagen interna del cuarto húmedo.	43
Figura 3. 16. Imagen externa del cuarto húmedo.	43
Figura 3. 17. Descriptores dinámicos de un sensor.	46
Figura 3. 18. Gráfica característica de un PT100.	47
Figura 3. 19. Conexión de un PT100 de dos hilos.	48
Figura 3. 20. Ambiente de operación del sensor de humedad HONEYWELL HIH-4030.	50
Figura 3. 21. Ambiente de almacenaje del sensor de humedad HONEYWELL HIH-4030.	50
Figura 3. 22. Circuito típico de Aplicación del sensor de humedad HONEYWELL HIH-4030.	51
Figura 3. 23. Resistencia de nicrom.	51
Figura 3. 24. Tubo de porcelana con canal en su contorno.	52
Figura 3. 25. Alambre de nicrom en espiral.	52
Figura 3. 26. Sistema de refrigeración de un frigobar.	53
Figura 3. 27. Electrobomba periférica.	54
Figura 3. 28. Interruptor Termomagnético Schneider Electric iC60N.	55
Figura 3. 29. Contactor Schneider Electric LC1D09.	56
Figura 3. 30. Relé CAMSCO P226 MY4.	57
Figura 3. 31. Transmisor de Temperatura TxRail 4-20 mA.	58
Figura 3. 32. Conexión de la interface TxConfig USB del Transmisor TxRail 4-20 mA.	58
Figura 3. 33. Pantalla Principal del software TxConfig del Transmisor TxRail 4-20 mA.	59
Figura 3. 34. Conexión eléctrica del Transmisor – PT100.	59
Figura 3. 35. Bloque terminas TB-1512.	60
Figura 3. 36. Fuente de alimentación DELTA DRP024V060W1AZ.	61
Figura 3. 37. PLC SIEMENS S7-300.	63
Figura 3. 38. Datos técnicos de la CPU del PLC.	64
Figura 3. 39. Datos técnicos de la CPU del PLC.	65
Figura 3. 40. PC Acer R3-471T-54T1.	67
Figura 3. 41. Comunicación entre la PC y el PLC con el PC Adapter USB.	68
Figura 3. 42. PC Adapter USB – LEDs y puerto MPI/DP.	69
Figura 3. 43. PC Adapter USB – puerto USB.	70
 Figura 4. 1. Topología de los productos SIMATIC.	 72
Figura 4. 2. Arquitectura de la solución de optimización.	73
Figura 4. 3. Diagrama de flujo de la solución.	75
Figura 4. 4. Diagrama de tiempo, desde la creación hasta la puesta en marcha del proceso.	76
Figura 4. 5. Crear proyecto.	77

Figura 4. 6. Agregar controlador.	78
Figura 4. 7. Agregar panel de operador.	78
Figura 4. 8. Vista de dispositivos (PLC_1).	79
Figura 4. 9. Vista de dispositivos (HMI_1).	79
Figura 4. 10. Dirección MPI del controlador.	80
Figura 4. 11. Dirección MPI del panel de operador.	80
Figura 4. 12. Asignación de direcciones digitales.	81
Figura 4. 13. Asignación de direcciones analógicas.	82
Figura 4. 14. Entradas analógicas a usar.	82
Figura 4. 15. Salida analógica a usar.	83
Figura 4. 16. Vista de redes.	85
Figura 4. 17. Segmento 1 del OB1.	86
Figura 4. 18. Segmento 2 del OB1.	88
Figura 4. 19. Segmento 3 del OB1.	89
Figura 4. 20. Segmento 4 del OB1.	90
Figura 4. 21. Segmento 5 del OB1.	91
Figura 4. 22. Segmento 6 del OB1.	92
Figura 4. 23. Segmento 1 del OB35.	94
Figura 4. 24. Diagrama de bloques del “CONT_C”.	96
Figura 4. 25. Pantalla principal del HMI.	97
Figura 4. 26. Ajustar interface PG/PC.	98
Figura 4. 27. Establecer conexión con el dispositivo.	99
Figura 4. 28. Vista preliminar de carga al dispositivo.	99
Figura 4. 29. Vista de resultados de operación de carga al dispositivo.	100
Figura 4. 30. Comunicación entre HMI y PLC.	100
Figura 4. 31. Vista general online de la programación.	101
Figura 4. 32. Vista general online de la tabla de variables.	102
Figura 4. 33. Vista del proceso en automático.	102
Figura 5. 1. Máquina para determinar la resistencia a la compresión (referencial).	103
Figura 5. 2. Proceso de fractura de la probeta cilíndrica de concreto (referencial).	103
Figura 5. 3. Fracturas Tipo 1, Tipo 2 y Tipo 3.	104
Figura 5. 4. Fracturas Tipo 4, Tipo 5 y Tipo 6.	105
Figura 5. 5. Resistencia a la compresión de las probetas azules.	108
Figura 5. 6. Resistencia a la compresión de las probetas rosadas.	108
Figura 5. 7. Resistencia a la compresión de las probetas azules vs rosadas.	109
Figura A. 1. Laboratorio Ing. Civil UPC.	120
Figura A. 2. Probetas rosadas a curar en el cuarto húmedo.	120
Figura A. 3. Probetas azules curadas de manera artesanal (en la poza de curado) a cargo del personal de Ing. Civil de la UPC.	121
Figura A. 4. Modo edición de ecuaciones MATLAB.	123
Figura A. 5. Modo SIMULINK MATLAB.	123
Figura A. 6. Modo osciloscopio MATLAB.	124

Figura A. 7. Informe de prueba de resistencia a la compresión 7 días de curado (Muestras Azul 1 y Rosado 1).	126
Figura A. 8. Informe de prueba de resistencia a la compresión 14 días de curado (Muestras Azul 2 y Rosado 2).	127
Figura A. 9. Informe de prueba de resistencia a la compresión 26 días de curado (Muestra Azul 3).	128
Figura A. 10. Informe de prueba de resistencia a la compresión 26 días de curado (Muestra Rosado 3).	129

ÍNDICE DE TABLAS

Contenido.....	Pág.
Tabla 2. 1. Parámetros de ajuste (método de oscilación).	27
Tabla 2. 2. Parámetros de ajuste (método de curva de reacción).	29
Tabla 3. 1. Valores del PT100 en Ohmios según temperatura.	48
Tabla 3. 2. Tabla de rendimiento del sensor de humedad HONEYWELL HIH-4030 (con alimentación de 5Vdc y 25°C).	49
Tabla 3. 3. Tabla de perfiles de bus y velocidades de transferencia.	69
Tabla 4. 1. Tabla de variables del proceso.	84
Tabla 4. 2. Tabla de variables HMI.	97
Tabla 5. 1. Tabla resumen de los valores obtenidos de resistencia a la compresión de las probetas curadas en el cuarto húmedo (rosadas) y las probetas curadas en la poza de curado del laboratorio de la UPC (azules).	107
Tabla A. 1. Constitución de la mezcla de la probeta de cemento utilizado.	119
Tabla A. 2. Resultados de las pruebas hechas con el sensor de humedad relativa.	122
Tabla A. 3. Tabla de costo de materiales y dispositivos utilizados para la construcción del cuarto húmedo.	125

INTRODUCCIÓN

El concreto es una mezcla de dos componentes los cuales son la pasta y los agregados. La pasta está compuesta de cemento Portland (cemento basado en la mezcla de caliza y arcilla) y agua mientras que los agregados están compuestos de arena y grava o piedra triturada; mezclados estos componentes, se obtiene una masa parecida a una roca debido a la reacción química entre el agua y el cemento¹. La característica principal del concreto es su resistencia a la compresión; sin embargo, también, tiene características poco favorables frente a otros tipos de esfuerzos; como lo son la tracción, la flexión, corte, etc; por lo que, para mejorar esas características o comportamiento, se pueden agregar aditivos y adicionales como colorantes, aceleradores, retardadores de fraguado, impermeabilizantes, fluidificantes, etc.²

La mayoría del concreto prefabricado es comprado y vendido sobre la base de los resultados de pruebas de resistencia a la compresión. Por lo tanto, las probetas de concreto para pruebas de resistencia a la compresión son muy importantes en la industria de la construcción del concreto. El organismo que estandariza la Americana para Testeo y Materiales, más conocido por sus siglas en inglés ASTM (American Society for Testing and Materials).

Para realizar las pruebas de resistencia, las muestras de concreto son puestas en probetas y al cabo de 24 horas, son alojadas en cuartos húmedos para ser curadas por 3, 7, 15 y 28 días. El curado es importante ya que permite que el cemento dentro de la mezcla permanezca el suficiente tiempo en contacto con el agua para lograr sus propiedades óptimas.

La tesis desarrollada se basa en la implementación de un cuarto húmedo para el correcto curado de probetas de concreto. Cabe resaltar, que se han utilizado sensores, actuadores, dispositivos y materiales de fácil adquisición en el mercado lo cual facilita su implementación.

Adicionalmente, el sistema de control será desarrollado con el Control Lógico Programable PLC SIMATIC S7-300 de SIEMENS.

¹ Polanco, 2018: Pág. 3.

² Concretos Selecto, 2018.

CAPÍTULO I. Introducción

1.1 Planteamiento del problema

En el Perú, las instituciones educativas que dictan cursos de construcción civil; en carreras universitarias como ingeniería civil y arquitectura o en carreras técnicas superiores como Suelos, Concreto y Asfalto, Edificaciones, Laboratorio de Suelos y Construcción Civil; enseñan a elaborar concreto el cual es almacenado en probetas que posteriormente son curadas³ para realizar pruebas de resistencia a la compresión. El problema radica en que estas muestras son curadas en pozas llenas de agua que hacen que la calidad del curado no sea la adecuada, con lo cual se obtendrán resultados de resistencia a la compresión diferentes a lo calculado en forma teórica. Por tal motivo, para que se realice un buen curado y se obtengan resultados esperados, es necesario contar con un ambiente adecuado con temperatura a $(23 \pm 2) ^\circ \text{C}$ y humedad relativa por encima de 95%, como lo decreta la norma ASTM C 511⁴, las cuales se obtendrán mediante la implementación y construcción de cuartos herméticos, que controlen los parámetros antes mencionados.

1.2 Ventajas y desventajas

1.2.1 Ventajas

- El curado de las probetas de concreto en el cuarto húmedo es adecuado, según norma ASTM C511, a diferencia del curado en pozas llenas de agua.
- El cuarto húmedo se ha fabricado con elementos modulares que se pueden adquirir en el mercado local lo cual permite que su reemplazo se realice de forma rápida.
- El encendido, apagado, pruebas de funcionamiento y el monitoreo del proceso son fáciles de realizar ya que se cuenta con programa SCADA.

³ La definición de curado de concreto se encuentra en el Capítulo II. Marco Teórico.

⁴ ASTM C 511: Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes. (Especificación para cuartos de mezcla, gabinetes húmedos, cuartos húmedos y tanques de almacenamiento de agua utilizados en la prueba de cementos y concretos hidráulicos).

1.2.2 Desventajas

- El cuarto húmedo cuenta con dos parrillas las cuales pueden albergar solo 6 probetas de concreto de 15cm de diámetro x 30cm de alto a diferencia de las pozas de curado que pueden albergar un gran número de probetas de concreto de diversas medidas.
- Por tener un ambiente controlado por equipos eléctricos y electrónicos, el cuarto húmedo consume energía eléctrica lo cual genera costos adicionales a diferencia de la poza de curado que no necesita energía eléctrica.

1.3 Justificación

La tesis abarca 3 niveles de justificación:

- **Nivel técnico**

La tesis generará un conocimiento técnico de cómo implementar cuartos húmedos para el curado de probetas de concreto el cual utilizará componentes de suministro local; así mismo, se generará el conocimiento del control proporcional integral utilizado para este tipo de cuartos.

- **Nivel económico**

La tesis se implementará con equipos y materiales de fácil adquisición en el mercado local lo cual garantizará que la inversión sea de bajo costo.

- **Nivel social**

La tesis beneficiará a las instituciones educativas que dictan cursos de construcción civil y especialmente a todos sus estudiantes, debido a que su aprendizaje con relación a la fabricación de concreto será experimentado, aprendiendo en forma práctica como se realiza el proceso del curado. Finalmente, se puede decir que, en su conjunto, la tesis beneficiará a la sociedad, debido a que esta tecnología será de conocimiento general.

1.4 Estado del arte

1.4.1 Reseña histórica

Si se habla de la historia del curado del concreto, es necesario hablar de la historia del cemento:

Desde que el hombre eligió construir edificaciones usando materiales arcillosos o pétreos, apareció la necesidad de conseguir pastas o morteros que faciliten la unión de estos materiales para poder tener estables las estructuras.

En un inicio, se utilizaron pastas a base de cal, yeso o arcilla; sin embargo, estos materiales se deterioraban en un tiempo corto ante eventos atmosféricos por lo que se empezó a usar mezcla de agua con rocas y minerales trituras para obtener pastas de mayor durabilidad.

Por ejemplo, en el antiguo Egipto, se usaron pastas que se obtuvieron con mezclas de caliza, yesos y agua para unir, de una manera sólida, los sillares de piedra; como los que aún se mantienen en la actualidad entre los bloques de calizos del revestimiento de la gran pirámide de Guiza.⁵

Hacia el año 500 A.C., en la antigua Grecia, se dio origen al primer concreto de la historia el cual consistía en la mezcla de caliza calcinada con arena y agua agregándole piedra triturada y usando tobas volcánicas extraídas de la isla de Santorini. Los antiguos romanos, obtuvieron su primer concreto aligerado utilizando el cemento puzolánico que se conseguía con la combinación química entre la tierra o cenizas volcánica, que contienen aluminio y sílice, y cal además, de adicionar en su masa, materiales de baja densidad, como la piedra pómez, o jarras cerámicas.

Entre las edificaciones que destacan, tenemos los arcos del coliseo romano, las bóvedas de las termas de Caracalla, la cúpula del Panteón de Agripa y los nervios de la bóveda de la Basílica de Majencio.⁶

En 1824, el albañil Joseph Aspdin de origen inglés, patentó un producto que denominó cemento Portland debido a que, al endurecerse, tomaba un color muy semejante a una

⁵ EcuRed, 2018.

⁶ EcuRed, 2018.

piedra de la isla Portland ubicada en Inglaterra. En 1838, por primera vez, el cemento fue utilizado en la construcción de los túneles ubicados bajo el río Támesis en Londres. El técnico David Saylor, de origen norteamericano, fue la primera persona en fabricar cemento en América por lo que, en 1850, la industria cementera nació en Norteamérica. Desde ese momento, el cemento Portland, se expandió hasta llegar a ser el material de construcción más requerido en el mundo.

La presencia del cemento y la de su producto resultante, el concreto, ha permitido que el mundo adquiera una fisonomía diferente. Casas, carreteras, calles, edificios, fábrica, talleres, avenidas, presas y canales han llenado de comodidad, protección y belleza el mundo donde realizamos nuestras actividades. ⁷

Algunas fechas importantes sobre el cemento son las siguientes:

- En 1824, Joseph Aspdin y James Parker patentan el Cemento Portland, producto obtenido de la calcinación de caliza arcillosa.
- En 1845, Isaac Johnson consigue realizar el prototipo del cemento moderno quemando, a alta temperatura, una mezcla de caliza y arcilla para la formación del “clinker”.
- En 1868, el cemento Portland es embarcado de Inglaterra a Estados Unidos por primera vez.
- En 1871, el cemento Portland es producido, por primera vez, en Estados Unidos por la compañía Coplay Cement.
- En 1904, la ASTM (American Standard For Testing Materials) publica, por primera vez, sus estándares de calidad para el cemento Portland.
- En 1906, la primera fábrica productora de cemento en México es instalada por Hidalgo Nuevo León.⁸

Con lo que respecta al curado, anteriormente, el concreto se curaba solo por la condiciones del medio ambiente y, posteriormente, echándole agua.

⁷ Arquba, 2018.

⁸ Arquba, 2018.

1.4.2 Antecedentes

Las empresas en el Perú que tienen cuartos húmedos para curar concreto son la cementeras; como lo son UNACEM, Pacasmayo y Yura; y las productoras de concreto premezclado, como lo son UNICON y MIXERCON. Estas empresas cuentan con laboratorios los cuales utilizan, básicamente, dos métodos para realizar el curado de sus muestras. El primer método consiste en sumergir las probetas en agua y controlar la temperatura y la humedad tanto del cuarto como del agua; el segundo método consiste en curar sus muestras mediante la aspersión de agua y controlando la temperatura y la humedad del cuarto. Los ambientes donde son curadas estas muestras son de áreas extensas.

1.4.3 Situación actual del Perú

En el Perú, las instituciones educativas, siguen utilizando métodos rudimentarios para el curado de probetas de concreto, ya que utilizan pozas cubiertas con agua a las cuales se les agrega cal para el curado de las muestras; sin embargo, en estos métodos no se controlan la temperatura ni la humedad, por lo que, con este tipo de curado, no se obtiene la resistencia a la compresión esperada según la mezcla.

1.5 Aplicaciones

La aplicación que se le da al cuarto húmedo de la presente tesis es curar probetas de concreto cilíndricas estándar de 15 cm de diámetro y 30 cm de alto a la temperatura y humedad requerida por la norma ASTM, $(23 \pm 2) ^\circ \text{C}$ y mayor al 95% de humedad relativa, para que alcance su mayor nivel de resistencia a la compresión.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Diseñar e implementar un cuarto húmedo dentro del cual se controlará la temperatura y la humedad relativa para que se encuentre dentro de los valores establecidos por la Norma ASTM, $(23 \pm 2) ^\circ \text{C}$ y mayor al 95% de humedad relativa.

1.6.2 Objetivos específicos

- Diseñar la estructura del cuarto húmedo y la distribución de los sensores y actuadores a utilizar.
- Diseñar el tablero eléctrico y la distribución de los componentes eléctricos a utilizar.
- Diseñar el circuito de tuberías para el paso de agua que se utilizará en el control de la humedad relativa dentro del cuarto húmedo.
- Implementar la tarjeta electrónica de sincronismo para el control de encendido del triac que manejará la corriente de las resistencias encargadas de calentar el ambiente e implementar el sistema de enfriamiento del ambiente dentro del cuarto húmedo.
- Desarrollar el algoritmo de control en el PLC Siemens S7-300 para el control de la temperatura y humedad relativa dentro del cuarto húmedo y un programa SCADA para el monitoreo del proceso.
- Obtener mejores resultados de resistencia a la compresión en las probetas curadas en el cuarto húmedo que las probetas curadas en la poza de la universidad UPC.

CAPÍTULO II. Marco teórico

2.1 Curado del concreto

El curado es el proceso por el cual se busca mantener saturado al concreto hasta que los espacios del cemento que, al estar recién elaborado y llenos de agua, sean reemplazados por los productos de hidratación del cemento. El curado controla el movimiento de temperatura y humedad hacia dentro y hacia afuera del concreto. Es por ello, la importancia de contar con un sistema automático que controle estas dos variables.

En sentido práctico curar el concreto es garantizar las condiciones óptimas de humedad y temperatura necesaria para que el concreto desarrolle su resistencia a la compresión reduciendo la porosidad de la mezcla.

2.1.1 Método de curado: Rociado

Existen diversos métodos de curado: curado con agua y con materiales sellantes. El primero puede ser de cuatro tipos: por inmersión, haciendo uso de rociadores, utilizando coberturas húmedas y utilizando arena o aserrín sobre el concreto fresco. El método a utilizar en la presente tesis para el curado del concreto es por roció.

“El rociado debe ser de una niebla muy fina, pues de otro modo dañara la superficie del concreto.” (IMCYC 2005)

En este sentido, es necesario curar el concreto, regando agua sobre su superficie, cuando existan las condiciones suficientes para considerar que el concreto, por sí solo, no tendrá suficiente agua para desarrollar sus propiedades o, aunque es suficiente, una buena parte se evaporará de la mezcla debido a la incidencia de factores externos que actúan sobre la superficie libre del elemento. Un adecuado y oportuno método de curado trae muchos beneficios a una estructura de concreto, y es tan sencillo de implementar, que no hacerlo es simplemente desperdiciar sus bondades⁹.

⁹ Sika, 2009: Pág. 4.

2.1.2 Hidratación del cemento

En la figura 2.1 se muestra cómo el cemento a pesar de tener un grano muy pequeño, no se hidrata totalmente sino que comienza desde la parte externa hacia el interior, quedando un núcleo que no reacciona desaprovechando su potencial. Por ello es necesario que, luego de producirse el fraguado, se debe seguir surtiendo agua para completar el proceso de hidratación. Este proceso es el que se denomina CURADO¹⁰.

Figura 2. 1. Hidratación de la partícula de cemento.

Fuente: Curado de concreto. (2009). Recuperado de <http://www.col.sika.com>

La hidratación del cemento a temperatura ambiente es caracterizada por varias etapas o períodos, los cuales se mencionan a continuación. Químicamente, la hidratación es un proceso complejo de disolución-precipitación, en el cual, las diferentes reacciones de hidratación se llevan a cabo a diferentes velocidades e influencia cada una.

Una manera de explicar las reacciones químicas en el proceso de hidratación del cemento es analizando las curvas de evolución de calor de hidratación. En la figura 2.2 se muestra gráficamente la hidratación del cemento en función de la cantidad de liberación de calor.

¹⁰ Toxement, 2016: Pág. 1.

Figura 2. 2. Representación esquemática de la hidratación del cemento.

Fuente: Ortiz, J. (2005). Estudio experimental sobre la influencia de la temperatura ambiental en la resistencia del hormigón preparado. Universidad Politécnica de Cataluña.

2.1.3 Resistencia a la compresión

La clave para el desarrollo tanto de la resistencia a la compresión como de las características de durabilidad del concreto, no es tanto el grado de hidratación del cemento sino el cómo los poros del cemento se han llenado con los productos de hidratación, dicho de otra manera: la resistencia y la durabilidad dependen fundamentalmente del grado de porosidad del concreto.

La figura 2.3 muestra el comportamiento del concreto en lo que respecta a su desarrollo de resistencia en función del tiempo y del tipo de curado proporcionado. Se ve claramente que un defecto de curado cambia drásticamente el potencial de resistencia a la compresión del concreto e incluso lesiona económicamente el proyecto ya que se obtiene un producto de inferior resistencia y durabilidad a aquel por el cual se pagó.

Figura 2. 3. Resistencia a la compresión de cilindros de 15x30 cm en función de los días y condiciones de curado.

Fuente: Curado de concreto. (2009). Recuperado de <http://www.col.sika.com>

Las mezclas del concreto se pueden diseñar de tal manera que tengan una amplia variedad de propiedades mecánicas y de durabilidad que cumplan con los requerimientos de diseño de la estructura. La resistencia a la compresión del concreto es la medida más común de desempeño que emplean los ingenieros para diseñar edificios y otras estructuras. La resistencia se mide fracturando probetas cilíndricas de concreto en una máquina de ensayos de compresión¹¹.

La resistencia a la compresión de la probeta se calcula mediante la siguiente formula:

$$R_c = \frac{4G}{\pi d^2} \quad (2.1)$$

Donde:

R_c → Resistencia de rotura a la compresión, en kilogramos por centímetro cuadrado

G → Carga máxima de rotura, en kilogramos

d → Diámetro de la probeta cilíndrica, en centímetros

¹¹ NRMCA, 2012: Pág. 1.

2.1.4 Clima cálido vs Clima frío

Para lograr la hidratación del cemento y que el concreto se endurezca, es necesario que la temperatura de la mezcla supere los 5°C, requerimiento que no es difícil de lograr en el medio en el cual nos encontramos, pero que puede constituirse en todo un reto para ciertas aplicaciones, lugares adversos y, por supuesto, en países con estaciones variables. Así como con bajas temperaturas los procesos de hidratación, endurecimiento y ganancia de resistencia se ven retardados, en climas cálidos estos procesos se aceleran. Mientras una mezcla curada a bajas temperaturas puede alcanzar a los 28 días una resistencia igual o mayor que la de diseño, en climas cálidos se genera un rápido desarrollo de resistencia inicial pero, si el proceso de curado es inadecuado o insuficiente, es factible que no se alcance la resistencia potencial del concreto.

Debido a esto, la necesidad de diseñar un cuarto hermético que controle la humedad y temperatura para lograr las mismas condiciones de curado en cualquier tipo de clima.

La figura 2.4 resume gráficamente lo expuesto anteriormente sobre la influencia del clima cálido y del clima frío en el desarrollo de la resistencia a la compresión de una mezcla de concreto.

Figura 2. 4. Efecto de las condiciones de temperatura en el desarrollo de resistencia del concreto.

Fuente: Curado de concreto. (2019). Recuperado de <http://www.col.sika.com>

2.1.5 Tiempo de curado

Siempre habrá discusión sobre qué tanto debe prolongarse el curado de una estructura. No existe una única respuesta para este interrogante. Desde hace ya varias décadas se aconsejaba que a un concreto de resistencia normal (21 a 35 Mpa a 28 días) se le diera un tiempo mínimo de curado 7 días. En cierta forma esto coincide con la especificación actual que dice que un concreto de resistencia normal debe curarse hasta que complete el 70% de la resistencia a compresión especificada. Por otra parte para un concreto de alta resistencia inicial se especifica que debe curarse 3 días y esto coincide, también, más o menos con la obtención para este tipo de concreto del 70% de resistencia a compresión. Sin embargo estas especificaciones parten de la convicción de que, en las condiciones de obra, la estructura curada como se especifica completará la hidratación del cemento y se alcanzará la resistencia especificada a los 28 días¹².

Figura 2. 5. Tiempos de curado mínimo recomendables de acuerdo con la temperatura y la humedad relativa del medio ambiente.

Fuente: Curado de concreto. (2019). Recuperado de <http://www.col.sika.com>

¹² Sika, 2009: Pág. 9.

2.1.6 Composición del cemento

Para elaborar la mezcla de concreto existen componentes básicos como el agua, agregado grueso o piedra, cemento, agregado fino o arena, y aditivo, todos estos elementos se vacían en este orden en la mezcladora. La secuencia de carga de los ingredientes en la mezcladora representa un papel importante en la uniformidad del producto terminado.

Otros factores importantes en el mezclado son el tamaño de la revoltura en relación al tamaño del tambor de la mezcladora, el tiempo transcurrido entre la dosificación y el mezclado, el diseño, la configuración y el estado del tambor mezclador y las paletas. Las mezcladoras aprobadas, con operación y mantenimiento correcto, aseguran un intercambio de materiales de extremo a extremo por medio de una acción de rolado, plegado y amasado de la revoltura sobre si misma a medida que se mezcla el concreto¹³.

Normalmente se le adiciona un pigmento (amarillo, rosado, gris) a dichos compuestos de curado, con el fin de provocar la reflexión de los rayos solares; además, el pigmento hace visible el compuesto al operario, facilitándole el control de cubrimiento.

2.2 Modelo matemático del sistema

Para el modelamiento del sistema es de suma importancia desarrollar tanto el modelo matemático de transferencia de calor como de humedad relativa bajo las condiciones dadas de diseño del cuarto hermético para el curado de las probetas de concreto. Dado que en el sistema se produce el intercambio de calor y de humedad relativa entre las probetas de concreto (objetos cilíndricos) y el ambiente controlado del cuarto hermético, es ahí en donde recae la importancia de aplicar el modelamiento incluyendo principios termodinámicos.

¹³ Froylan Jara, 2011: Pág. 18.

Figura 2. 6. Diagrama de bloques de lazo de control.

Fuente: Elaboración propia.

2.2.1 Función de transferencia del control PI (G1)

$$v_c(t) = k_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int k_p e(t) dt \quad (2.2)$$

Aplicando Laplace:

$$V_c(s) = K_p E(s) + \frac{1}{s T_i} K_p E(s) \quad (2.3)$$

$$V_c(s) = K_p E(s) \left(1 + \frac{1}{s T_i}\right) \quad (2.4)$$

$$G_1 = \frac{V_c(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{s T_i}\right) \quad (2.5)$$

Donde:

$V_c \rightarrow$ Salida controlada

$E \rightarrow$ Entrada

$K_p \rightarrow$ Constante proporcional

$T_i \rightarrow$ Constante de tiempo integrativo

2.2.2 Función de transferencia de la fase de tensión AC (G2)

$$i_{ef} = \frac{V_p}{R_L} \sqrt{\frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{4\pi}} \quad (2.6)$$

$$\varphi = \pi - \alpha \quad (2.7)$$

$$V_{efL} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \quad (2.8)$$

$$i_{ef} = \frac{V_{efL}}{R_L} \sqrt{\frac{2\varphi + \sin 2\varphi}{2\pi}} \quad (2.9)$$

Donde:

$\alpha \rightarrow$ Ángulo de disparo desde cero

$V_p \rightarrow$ Valor pico de la tensión sinusoidal

$V_{efL} \rightarrow$ Valor eficaz de la tensión de línea

$\varphi \rightarrow$ Ángulo de disparo hasta 180°

$R_L \rightarrow$ Resistencia de calefacción del horno

Figura 2. 7. Linealización de corriente eficaz en función del ángulo de disparo.

Fuente: Elaboración propia.

Esta ecuación de i_{ef} con respecto a V_{efL} , es lineal entre 80° y 150° , con una variación de tensión desde 0.78 hasta 0.17, con un total de $\left(\frac{0.78-0.17}{80-150}\right) = -0.00875$ veces (pendiente de la recta).

Siendo la ecuación de la recta:

$$i_{ef} = \frac{V_{efL}}{R_L} [-0.009 \varphi] \quad (2.10)$$

Relación Vc con φ :

$$V_c = \frac{V_{cmax}}{180} \varphi \quad (2.11)$$

Donde:

$$V_{cmax} = 2.5 V_{DC} \quad (2.12)$$

Por lo tanto:

$$\varphi = 72 V_c \quad (2.13)$$

Reemplazando en i_{ef} :

$$i_{ef} = \frac{V_{efL}}{R_L} [-0.648 V_c] \quad (2.14)$$

Hallando G_2 :

$$G_2 = \frac{I_{ef}(s)}{V_c(s)} = -0.648 \left(\frac{V_{efL}}{R_L} \right) \quad (2.15)$$

2.2.3 Flujo de calor producido por la resistencia (G3)

$$FQ_{CR}(s) = 0.24 I_{ef}(s)^2 R_L \quad (2.16)$$

$$\frac{dFQ_{CR}(s)}{dI_{ef}(s)} = 0.24 (2I_o) R_L = 0.48 I_o R_L \quad (2.17)$$

$$FQ_{CR}(s) = 0.48 I_o R_L I_{ef}(s) \quad (2.18)$$

Haciendo:

$$V_o = I_o R_L \quad (2.19)$$

$$FQ_{CR} = 0.48 V_o I_{ef} \quad (2.20)$$

$$G3 = \frac{FQ_{CR}(s)}{I_{ef}(s)} = 0.48 V_o \quad (2.21)$$

Donde:

$FQ_{CR} \rightarrow$ Flujo de calor de resistencia R_L

2.2.4 Calor en un horno (G4)

$$FQ_{CR}(s) = K_a T_{ah}(s) + K_b \frac{dT_{ah}(s)}{dt} \quad (2.22)$$

$$FQ_{CR}(s) = K_a T_{ah}(s) + K_b s T_{ah}(s) \quad (2.23)$$

$$FQ_{CR}(s) = T_{ah}(s) (K_b s + K_a) = K_b T_{ah}(s) \left(s + \frac{K_a}{K_b} \right) \quad (2.24)$$

$$G4 = \frac{T_{ah}(s)}{FQ_{CR}(s)} = \frac{1}{K_b \left(s + \frac{K_a}{K_b} \right)} \quad (2.25)$$

Donde:

$a \rightarrow$ Superficie de contacto cilíndrico

$h \rightarrow$ Coeficiente de transmisión de calor

$K_a, K_b \rightarrow$ Coeficiente que hace referencia a las dimensiones del horno

2.2.5 Función de transferencia final (G)

$$G = G_1 \times G_2 \times G_3 \times G_4 \quad (2.26)$$

$$G = K_p \left(1 + \frac{1}{s T_i} \right) \times \left(-0.648 \frac{V_{efL}}{R_L} \right) \times 0.48 V_o \times \frac{1}{K_b \left(s + \frac{K_a}{K_b} \right)} \quad (2.27)$$

2.2.6 Potencia disipada

$$P = \frac{V_{ef}^2}{R_L} \left(\frac{2\varphi - \sin 2\varphi}{2\pi} \right) \quad (2.28)$$

Figura 2. 8. Linealización de la potencia en función del ángulo de disparo.

Fuente: Elaboración propia.

Esta ecuación de P con respecto a φ , es lineal entre 1.05 rad y 2.09 rad, con una variación de potencia desde 250 hasta 1250 watts, con un total de $\left(\frac{1250-250}{2.09-1.05}\right) = 954.92$ veces (pendiente de la recta).

$$m = \frac{dP}{d\varphi} = \frac{V_{ef}^2}{2\pi R_L} (2 - 2 \cos 2\varphi) \quad (2.29)$$

$$m(\varphi = 90) = \frac{220^2}{\pi \times 32.27} (1 - 1 \cos 180) = 954.92 \quad (2.30)$$

2.2.7 Nueva función de transferencia (G)

$$G = K_p \left(1 + \frac{1}{s T_i}\right) \times \left(\frac{\pi}{V_{cmax}}\right) 954.92 \times \frac{1}{K_b \left(s + \frac{K_a}{K_b}\right)} \quad (2.31)$$

Donde:

$$K_a = 7.69 \quad (2.32)$$

$$K_b = 500 \quad (2.33)$$

$$V_{cmax} = 2.5 V_{DC} \quad (2.34)$$

$$W_i = \frac{1}{T_i} \quad (2.35)$$

$$G = \frac{2.4K_p(s+W_i)}{s+s(0.01538)} \quad (2.36)$$

2.2.8 Función de transferencia en lazo cerrado (FT)

$$FT = \frac{G}{1+GH} = \frac{2.4K_p(s+W_i)}{s^2+s(0.01538+0.24K_p)+0.24K_pW_i} \quad (2.37)$$

$$FT = \frac{K_1(s+W_i)}{s^2+s(W_a+K_1)+K_1W_i} \quad (2.38)$$

$$FT = K_1 \left(\frac{(s+a)}{(s+a)^2+W_o^2} + \frac{(W_i-a)}{(s+a)^2+W_o^2} \right) \quad (2.39)$$

Donde:

$$K_1 = 2.4K_p \quad (2.40)$$

$$W_a = 0.01538 \quad (2.41)$$

$$a = \left(\frac{W_a+K_1}{2} \right) = 0.00769 + 1.2K_p \quad (2.42)$$

$$W_o = \sqrt{K_1W_i - a^2} = \sqrt{\frac{2.4K_p}{T_i} - (0.00769 + 1.2K_p)^2} \quad (2.43)$$

Con:

$$K_p = 0.1 \quad (2.44)$$

$$T_i = 10 \quad (2.45)$$

Entonces:

$$a = 0.12769 \text{ Ceros} \quad (2.46)$$

$$W_o = 0.0877 \text{ Polos} \quad (2.47)$$

2.3 Investigación teórica de reguladores de control

Figura 2. 9. Diagrama de bloques de Control de Lazo Cerrado.

Fuente: Vargas, B. (2011). Control de lazo abierto y lazo cerrado. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.

La señal del sensor es del tipo eléctrica; por tanto, la señal de referencia debe ser también eléctrica. De estas dos señales, se obtendrá la señal de error que también será eléctrica; por ende, el controlador debe de ser del tipo de sistema eléctrico, específicamente electrónico, por lo cual el actuador debe responder ante entradas eléctrica.

Figura 2. 10. Control manual.

Fuente: Vargas, B. (2011). Sistemas de control de lazo abierto y lazo cerrado. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.

Figura 2. 11. Diagrama de bloques de control manual.

Fuente: Vargas, B. (2011). Sistemas de control de lazo abierto y lazo cerrado. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.

Figura 2. 12. Señales en el diagrama de bloques.

Fuente: Vargas, B. (2011). Sistemas de control de lazo abierto y lazo cerrado. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.

Figura 2. 13. Diagrama de bloques desde el punto de vista del controlador.

Fuente: Vargas, B. (2011). Sistemas de control de lazo abierto y lazo cerrado. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.

2.3.1 Controlador PID

Los controladores PID, incluyen tres acciones: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D).

Figura 2. 14. Lazo cerrado con control PID.

Fuente: Mazzone, V. (2002). Controladores PID. Universidad Nacional de Quilmes.

- La acción de control proporcional (P), da una salida proporcional al error, es decir: $u(t) = K_p \cdot e(t)$, que descrita desde su función de transferencia queda:

$$C_p(s) = K_p \quad (2.48)$$

Donde K_p es una ganancia proporcional. Un controlador proporcional puede controlar cualquier planta que sea estable, pero posee desempeño de trabajo limitado. Cabe resaltar que este tipo de controlador es simple, fácil de sintonizar (un solo parámetro) y puede reducir, pero no eliminar, el error en estado estacionario.

Figura 2. 15. Control P.

Fuente: Morilla, F. (2007). El controlador PID. Universidad Nacional de Educación a Distancia.

- PI: acción de control proporcional-integral, se define mediante

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.49)$$

Donde T_i se denomina tiempo integral y es quien ajusta la acción integral. La función de transferencia resulta:

$$C_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (2.50)$$

Con un control proporcional es necesario que exista error para tener una acción de control distinta de cero. Con acción integral un error pequeño positivo siempre nos dará una acción de control creciente, y si fuera negativo la señal de control será decreciente.

Muchos controladores industriales tienen solo acción PI. Se puede demostrar que un control PI es adecuado para todos los procesos donde la dinámica es esencialmente de primer orden. Lo que puede demostrarse en forma sencilla, por ejemplo, mediante un ensayo al escalón¹⁴.

Este control es muy usado para controlar señales que varían lentamente en el tiempo, como es el caso de la temperatura, en donde el tiempo de establecimiento es lento. Debido a esto, el control PI es ideal para cumplir con uno de los propósitos establecidos en la presente tesis de controlar la temperatura dentro del cuarto hermético diseñado.

Figura 2. 16. Control PI.

Fuente: Morilla, F. (2007). El controlador PID. Universidad Nacional de Educación a Distancia.

¹⁴ Virginia Mazzone, 2002: Pág. 2.

- La acción de control proporcional-integral-derivativa (PID), es una acción combinada que reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.51)$$

Y su función de transferencia resulta:

$$C_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.52)$$

Cabe resaltar que este tipo de controlador elimina el error en estado estacionario con la acción integral y puede anticipar el futuro con la acción derivativa.

Figura 2. 17. Control PID.

Fuente: Morilla, F. (2007). El controlador PID. Universidad Nacional de Educación a Distancia.

2.3.2 Métodos clásicos de ajuste Ziegler-Nichols para controladores PID

Existen dos métodos de ajuste de las ganancias de un controlador PID, el método de oscilación y el método en la curva reacción. El primero se basa en un lazo de control solo con ganancia proporcional y de acuerdo a la ganancia utilizada para que el sistema empiece a oscilar y al periodo de esas oscilaciones, podemos establecer las ganancias del controlador PID. El otro método se resume en ensayar al sistema a lazo abierto con un

escalón unitario, se calculan algunos parámetros, como la máxima pendiente de la curva y el retardo, y con ellos establecemos las ganancias del controlador PID¹⁵.

2.3.2.1 El método de oscilación

Este procedimiento es válido solo para plantas estables a lazo abierto.

Figura 2. 18. Lazo cerrado solo con ganancia proporcional.

Fuente: Mazzone, V. (2002). Controladores PID. Universidad Nacional de Quilmes.

- Utilizando solo control proporcional, se inicia con un valor de ganancia pequeño, hasta incrementar dicha ganancia para que el lazo comience a oscilar.
- Registrar la ganancia crítica del controlador $K_p = K_c$ y el periodo de oscilación de la salida del controlador P_c .

	K_p	T_i	T_d
P	$0.50K_c$		
PI	$0.45K_c$	$\frac{P_c}{1.2}$	
PID	$0.60K_c$	$0.5P_c$	$\frac{P_c}{8}$

Tabla 2. 1. Parámetros de ajuste (método de oscilación).

Fuente: Mazzone, V. (2002). Controladores PID. Universidad Nacional de Quilmes.

¹⁵ Virginia Mazzone, 2002: Pág. 3.

Figura 2. 19. Respuesta de la planta con ganancia crítica.

Fuente: Mazzone, V. (2002). Controladores PID. Universidad Nacional de Quilmes.

2.3.2.2 El método de la curva de reacción

Una versión lineal de este modelo puede ser obtenida mediante una prueba a lazo abierto.

- Con la planta a lazo abierto, llevar a la planta a un punto de operación normal. Digamos que la salida de la planta se estabiliza en $y(t) = y_0$ para una entrada constante $u(t) = u_0$.
- En el instante inicial t_0 , aplicar un cambio en la entrada escalón, desde u_0 a u_∞ .
- Registrar la salida hasta que se estabilice en el nuevo punto de operación. Supongamos que la curva que se obtiene es la que se muestra en la figura 2.20. Esta curva se llama curva de reacción del proceso.

Figura 2. 20. Respuesta al escalón de la planta.

Fuente: Mazzone, V. (2002). Controladores PID. Universidad Nacional de Quilmes.

	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{v_0}{K_0 \tau_0}$		
PI	$\frac{0.9 v_0}{K_0 \tau_0}$	$3 \tau_0$	
PID	$\frac{1.2 v_0}{K_0 \tau_0}$	$2 \tau_0$	$0.5 \tau_0$

Tabla 2. 2. Parámetros de ajuste (método de curva de reacción).

Fuente: Mazzone, V. (2002). Controladores PID. Universidad Nacional de Quilmes.

CAPÍTULO III. Descripción de la etapa de hardware

3.1 Descripción del Hardware

El producto final obtenido es un cuarto húmedo de 1.20m de alto, 1.00m de ancho y 0.60m de profundidad construido de madera OSB. El cuarto húmedo cuenta con una parrilla en su interior la cual servirá para albergar las probetas de concreto y una ventana, hecha de caucho y ubicada en la parte superior de la pared lateral derecha, que ayuda a liberar el exceso de presión por el aire caliente generado. Además, cuenta con un sensor de temperatura, PT100 de dos hilos, que es el encargado de medir la temperatura interna del cuarto; un sensor de Humedad, HONEYWELL HIH-4030, que se encarga de medir la humedad relativa y tres tipos de actuadores, dos para calibrar la temperatura: una mediante la resistencia de Nicrom para calentar y otro mediante un compresor para enfriar la el cuarto húmedo; así como uno para calibrar la humedad, que trabaja con una electrobomba periférica con su aspersor para aumentar el porcentaje de humedad relativa. El calentamiento, cuando la temperatura es menor de 23°C, se controla mediante un sistema realimentado o “feedback” PI; mientras que para enfriar el ambiente, cuando se encuentre arriba de a 24°C, se utiliza un controlador de tipo ON-OFF. En cuanto al actuador para regular la humedad relativa, este es un controlador del tipo ON-OFF.

Se ha utilizado un controlador PI para calentar debido a que elimina el error estacionario con la acción integral y siendo la temperatura un parámetro de alta inercia, no se requiere el factor derivativo en esta aplicación.

3.2 Funcionamiento del Sistema

Cuando la temperatura del cuarto esté por debajo de la temperatura de 23 ° C, el controlador PI procede a hacer funcionar la resistencia para que esta caliente; como la temperatura va en aumento, la presión del aire va a aumentar proporcionalmente lo cual provocaría que la presión del aire interior al cuarto sea mayor a la presión del aire exterior, por consiguiente,

la ventana superior se abrirá igualando ambas presiones, con lo cual no hay exceso de presión del que afecte el proceso del sistema. Llegado el valor de 24°C, el controlador PI deja de encender la resistencia.

Cuando la temperatura del cuarto está por encima de la temperatura de 24°C, se activa el sistema de enfriamiento, trabajando con un control ON-OFF. Finalmente, se cuenta con una electrobomba periférica y un aspersor, unidos mediante un circuito de tuberías, para mantener la humedad mayor a 95%. En caso la humedad baje de ese valor, la electrobomba periférica entrará en funcionamiento para que se realice la aspersión de agua cuya presión de salida será regulada mediante una válvula mecánica tipo abrir – cerrar. Para el control se ha usado un PLC Siemens S7-300.

3.3 Diagrama de bloques del Sistema

Los controles de temperatura y humedad son independientes. En el primer caso, se utiliza un controlador PI para luego efectuar un control de fase sobre la resistencia de Nicrom cuando la temperatura sea menor a 23°C y, cuando la temperatura sea mayor a 24°C, se utiliza un controlador ON/OFF que enfría el ambiente con un sistema de enfriamiento basado en un compresor. El control de humedad también trabaja con un controlador ON/OFF, siendo su valor consigna 95%, activándose cuando baja de ese valor.

3.3.1 Diagrama de bloques del Control de Temperatura

A continuación se mostrarán los diagramas de bloque de los controles de temperatura:

3.3.1.1 Diagrama de bloques cuando la temperatura sea menor a 23°C

Se utiliza un control PI cuando la temperatura sea menor a 23°C.

Figura 3. 1. Diagrama de bloques del control de temperatura cuando esta sea menor a 23°C.

Fuente: Elaboración propia

Donde:

r = señal de referencia (representación eléctrica de 23°C).

$x(t)$ = señal del PT100, sensada y acondicionada.

$e(t)$ = señal resultante de la diferencia entre r y $x(t)$.

$u(t)$ = señal de salida del PLC.

$c(t)$ = señal de salida del TRIAC que controla la potencia de la resistencia.

$temp(t)$ = temperatura dentro del cuarto húmedo.

$y(t)$ = señal sensada por el PT100.

La señal de referencia r será comparada con la señal $x(t)$, explicada más adelante, y se obtendrá la señal de error $e(t)$ que ingresará al PLC para ser procesada por el algoritmo de control de temperatura implementado; de este proceso, se obtendrá una señal de control $u(t)$ que ingresará a la interface del control del TRIAC el cual se encargará de regular la potencia de la resistencia que calentará el cuarto húmedo mediante la señal $c(t)$. El PT100 sensorará la temperatura dentro del cuarto húmedo la cual será expresada en la señal $y(t)$ y acondicionada, por un transmisor de temperatura, para que esté en un rango de señal de amperaje entre 4mA y 20mA, con la que trabaja el PLC, obteniendo la señal $x(t)$.

3.3.1.1.1 Diagrama de interface para el control del TRIAC

La señal $u(t)$ es la salida del PLC que será una señal de voltaje continuo en régimen estacionario. Esta señal será comparada con un generador de diente de sierra sincronizado con la red eléctrica. De esta manera, el opto acoplador se activará cuando la señal de diente de sierra sea mayor a la señal $u(t)$. Esto disparará al TRIAC. Lo que significa que mientras se necesite más temperatura en la resistencia, el PLC entregará una señal continua más baja.

Al final del bucle se coloca un circuito en serie donde están: el TRIAC (con su circuito de activación), la toma de corriente de 220 Vac y la resistencia de Nicrom. Entonces, la señal $c(t)$ que controla la potencia de la resistencia tiene la forma de onda de la figura 24.

Figura 3. 2. Forma de onda de $c(t)$.

Fuente: Elaboración propia

Figura 3. 3. Diagrama de bloques de la interface de control del TRIAC.

Fuente: Elaboración propia

Donde:

$u(t)$ = señal de salida del PLC.

$c(t)$ = señal de salida del TRIAC que controla la potencia de la resistencia.

3.3.1.1.2 Diagrama del bloque de acondicionamiento de señal

Básicamente, el acondicionamiento de la señal se hace para que el PLC reciba una señal de corriente entre 4 mA y 20 mA. Para tal propósito, se ha conectado el PT100 de dos hilos al transmisor de temperatura Novus modelo TxRail 4-20mA que es el encargado de brindar la señal en el rango de amperaje deseado.

Figura 3. 4. Diagrama de bloques del acondicionamiento de la señal.

Fuente: Elaboración propia

Donde:

$temp(t)$ = temperatura dentro del cuarto húmedo.

$y(t)$ = señal sensada por el PT100.

$x(t)$ = señal sensada del PT100 acondicionada

Figura 3. 5. Circuito utilizado para el Control de temperatura.

Fuente: Gutiérrez, M. (2010). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.

3.3.1.2 Diagrama de bloques cuando la temperatura sea mayor a 24°C

El control de temperatura, cuando la temperatura sea mayor a 24°C, es del tipo ON/OFF. Un relé está conectado a una de las salidas digitales del PLC, el cual activa o desactiva al contactor que acciona el sistema de enfriamiento.

El circuito se cerrará siempre y cuando la temperatura, al interior del cuarto húmedo, sea mayor a 24°C.

Figura 3. 6. Diagrama de bloques del control de temperatura cuando esta sea mayor a 24°C.

Fuente: Elaboración propia

Donde:

$x(t)$ = señal sensada del PT100 acondicionada.

$temp(t)$ = temperatura dentro del cuarto húmedo.

$y(t)$ = señal sensada por el PT100.

3.3.2 Control de bloques del Control de Humedad

El control de humedad es del tipo ON/OFF. El sensor de humedad brinda un voltaje continuo de salida de 0V a 5V el cual es recepcionado por el PLC y, posteriormente, escalado para mostrar el porcentaje real de humedad relativa al interior del cuarto húmedo.

Un relé está conectado a una de las salidas digitales del PLC, el cual activa o desactiva al contactor que acciona a la electrobomba periférica.

El circuito se cerrará siempre y cuando la humedad relativa, al interior del cuarto húmedo, baje de 95%.

Figura 3. 7. Diagrama de bloques del control de humedad.

Fuente: Elaboración propia

Donde:

$y(t)$ = señal sensada por el sensor de humedad.

$hum(t)$ = humedad relativa dentro del cuarto húmedo.

3.4 Diseño del Hardware

3.4.1 Diseño de la estructura del cuarto húmedo

La estructura del cuarto húmedo será construido con tablero OSB y contará con dos parrillas en su interior las cual servirán para albergar las probetas de concreto y una ventana, ubicada en la parte superior de la pared lateral derecha, que ayuda a liberar el exceso de presión por el aire caliente generado.

-
- Technical drawing of a cabinet with the following dimensions:
- Overall width: 1,00m
 - Overall height: 1,2m
 - Left door width: 0,61m
 - Right door width: 0,36m
 - Right door handle offset: 0,03m

Fuente: Elaboración propia

- [illegible]

Fuente: Elaboración propia

- Vista transversal lateral derecha:

Figura 3. 10. Vista transversal lateral derecha del cuarto húmedo.

Fuente: Elaboración propia

- Vista superior:

Figura 3. 11. Vista superior del cuarto húmedo.

Fuente: Elaboración propia

3.4.2 Diseño del tablero eléctrico

El tablero eléctrico será construido de madera rectangular de 40cm x 110cm y contará con dos rieles din de 35mm para el montaje de los elementos eléctricos; en el riel din ubicado en la parte superior se montarán el interruptor termomagnético y la fuente de alimentación AC/DC y en el riel din ubicado en la parte inferior se montarán los relés y los contactores. Además, se montarán 5 bloques terminales para conectar, de manera ordenada, el sistema mediante cables. Por último, contará con un riel din de 482mm donde se montará el PLC Siemens S7-300.

Figura 3. 12. Diseño del tablero eléctrico y distribución de los componentes eléctricos.

Fuente: Elaboración propia

Figura 3. 13. Diagrama eléctrico de los componentes del tablero eléctrico.

Fuente: Elaboración propia

3.4.3 Diseño del circuito de tuberías

El circuito de tuberías se basará en tubos de pvc de 1" que tendrá un recorrido desde la parte inferior del cuarto (donde está conectado con la bomba de agua encargada de bombear el agua acumulada en un tanque) hacia el techo del cuarto húmedo para que la aspersión de agua sea en caída desde la parte superior hacia la parte inferior dentro del cuarto húmedo.

Figura 3. 14. Circuito de tuberías para el paso de agua que se utilizará en el control de la humedad relativa dentro del cuarto húmedo.

Fuente: Elaboración propia

3.4.4 Cuarto húmedo ensamblado

Figura 3. 15. Imagen interna del cuarto húmedo.

Fuente: Elaboración propia

Figura 3. 16. Imagen externa del cuarto húmedo.

Fuente: Elaboración propia

3.5 Instrumentación

La instrumentación industrial es la elección y el empleo adecuado de equipos de regulación, medición y mando que participan en un proceso de producción industrial; cabe resaltar, que esta va a depender de los procesos que tenga la industria. Además, la instrumentación, es el conjunto de componentes que sirve para controlar, medir o registrar variables de un proceso con el objetivo de optimizar los recursos empleados en este.¹⁶

3.5.1 Sensores

Los sensores son dispositivos eléctricos y/o mecánicos que transforman magnitudes físicas; como luz, temperatura, humedad, magnetismo, presión, etc; en valores medibles de dicha magnitud. Todo esto se lleva a cabo en dos fases:

- El sensor utilizado captura el fenómeno físico a ser medido y se obtiene una señal de salida eléctrica que depende de la variable física.
- Un sistema de acondicionamiento de señal modifica la señal eléctrica para obtener una salida en voltaje o amperaje.¹⁷

3.5.1.1 Descriptores de un Sensor

A continuación, se detallarán los descriptores estáticos y dinámicos de un sensor:

3.5.1.1.1 Descriptores estáticos de un sensor

Los descriptores estáticos de un sensor determinan su comportamiento en régimen estacionario:

- **Rango:** son los valores máximos y mínimos para las variables de entrada y de salida de un sensor.

¹⁶ Bullón, 2009: Pág. 50.

¹⁷ Ramírez, 2013: Pág. 57.

- **Exactitud:** es la desviación que se genera en la lectura de un sistema medido respecto a la entrada.
- **Repetitividad:** es la facultad de reproducir la lectura con una precisión dada.
- **Reproducibilidad:** posee el mismo significado que la repetitividad excepto que se usa cuando se cogen distintas medida bajo diferentes condiciones.
- **Resolución:** es la mínima cantidad de medida que se puede detectar.
- **Error:** es la diferencia que se genera entre el valor real y el valor medio.
- **No linealidad:** Es cuando su valor real tiene una desviación en su medida. Algunos ejemplos son la saturación, zona muerta e histéresis.
- **Sensibilidad:** es la razón de cambio de la salida con respecto a cambios en la entrada ($s = \partial V / \partial x$).
- **Excitación:** es la cantidad de voltaje o corriente que se necesita para que funcione le sensor.
- **Sensibilidad:** en la posibilidad de que un sensor muestre la misma salida en un rango en el cual la permanece la entrada constante.¹⁸

3.5.1.1.2 Descriptores dinámicos de un sensor

A continuación, se detallarán los descriptores dinámicos de un sensor:

- **Tiempo de retardo:** representado en la gráfica como t_d , es el tiempo que, la salida del sensor, demora en alcanzar el 50% de su valor final.
- **Tiempo de subida:** representado en la gráfica como t_r , es el tiempo que demora, la salida del sensor, en lograr su valor final.

¹⁸ Ramírez, 2013: Pág. 58.

- **Tiempo de pico:** representado en la gráfica como t_p , es el tiempo que demora, la salida del sensor, en lograr el pico más alto de su sobreoscilación.
- **Pico de sobreoscilación:** representado en la gráfica como M_p , es la manifestación de cuanto se eleva la evolución temporal de la salida del sensor respecto a su valor final.
- **Tiempo de establecimiento:** representado en la gráfica como t_s , es el tiempo que demora, la salida del sensor, en entrar en la banda del 5% en torno al valor final y ya no vuelva a salir de ella.¹⁹

Figura 3. 17. Descriptores dinámicos de un sensor.

Fuente: Ramírez, C. (2013). Optimización del consumo de energía en bandas transportadoras por medio de un algoritmo genérico de automatización según la carga definida. Universidad de San Carlos de Guatemala.

3.5.1.2 Sensores utilizados en la tesis

Para el desarrollo de la tesis se han usado dos sensores; un sensor de temperatura, PT100 de dos hilos, para medir la temperatura y un sensor de humedad, HONEYWELL HIH-4030, para medir la humedad relativa al interior del cuarto húmedo. A continuación, se detallará información de estos sensores:

¹⁹ Ramírez, 2013: Pág. 59.

3.5.1.2.1 Sensor de temperatura PT100

El PT100 es un sensor de temperatura tipo RTD (Dispositivo Termo Resistivo) que se basa en un alambre de platino que tiene un valor de 100 ohms cuando la temperatura es de 0°C y que al incrementarse la temperatura, aumenta el valor de resistencia eléctrica.

El aumento de la resistencia eléctrica es bastante lineal creciente, lo cual es característico del platino, por lo que es posible saber el valor exacto de temperatura correspondiente mediante tabla.²⁰

Figura 3. 18. Gráfica característica de un PT100.

Fuente: PT100, su operación, instalación y tablas. Recuperado de <http://www.arian.cl>

3.5.1.2.1.1 Ventajas del PT100

- Se pueden utilizar en aplicaciones de baja temperatura (-100°C a 400°C), siendo más lineales que las termocuplas.
- Entrega lecturas de una décima de grado de precisión y tiene la ventaja de no descomponerse gradualmente entregando lecturas equivocadas.
- Puede tener una extensión de hasta 30 m utilizando cable convencional de cobre; es decir, puede ser colocado, a esa distancia, sin afectar su precisión.²¹

²⁰ Arian, 2018: Pág. 1.

²¹ Arian, 2018: Pág. 1-2.

3.5.1.2.1.2 Conexión del PT100

Existen 3 modos de conexión con el objetivo de obtener la resistencia eléctrica $R(t)$:

- Conexión con 2 hilos.
- Conexión con 3 hilos.
- Conexión con 4 hilos.

Para el desarrollo de la tesis, se ha utilizado un PT100 de dos hilos el cual es el modo más sencillo de conexión debido a que ya que solo se manejan 2 cables.

Figura 3. 19. Conexión de un PT100 de dos hilos.

Fuente: PT100, su operación, instalación y tablas. Recuperado de <http://www.arian.cl>

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-60	76.26	75.86	75.46	75.06	74.67	74.27	73.87	73.47	73.07	72.67
-50	80.25	79.85	79.45	79.06	78.66	78.26	77.86	77.46	77.06	76.66
-40	84.22	83.83	83.43	83.03	82.64	82.24	81.84	81.44	81.05	80.65
-30	88.18	87.79	87.39	87.00	86.60	86.21	85.81	85.41	85.02	84.62
-20	92.13	91.74	91.35	90.95	90.56	90.16	89.77	89.37	88.98	88.58
-10	96.07	95.68	95.29	94.89	94.50	94.11	93.71	93.32	92.92	92.53
0	100.00	99.61	99.22	98.82	98.43	98.04	97.65	97.25	96.86	96.47
0	100.00	100.39	100.78	101.17	101.56	101.95	102.34	102.73	103.12	103.51
10	103.90	104.29	104.68	105.07	105.46	105.85	106.24	106.63	107.02	107.41
20	107.79	108.18	108.57	108.96	109.35	109.74	110.12	110.51	110.90	111.29
30	111.67	112.06	112.45	112.84	113.22	113.61	114.00	114.38	114.77	115.16
40	115.54	115.93	116.32	116.70	117.09	117.47	117.86	118.24	118.63	119.01
50	119.40	119.78	120.17	120.55	120.94	121.32	121.71	122.09	122.48	122.86
60	123.24	123.63	124.01	124.39	124.78	125.16	125.54	125.93	126.31	126.69

Tabla 3. 1. Valores del PT100 en Ohmios según temperatura.

Fuente: PT100, su operación, instalación y tablas. Recuperado de <http://www.arian.cl>

3.5.1.2.2 Sensor de humedad HONEYWELL HIH-4030

El sensor de humedad HONEYWELL HIH-4030 mide de 0% a 100% de humedad relativa y su salida puede ingresar directamente a la entrada de un controlador o dispositivo gracias a que entrega un voltaje lineal muy cercano a su alimentación; además, es ideal para sistemas de bajo consumo ya que utiliza una corriente de solo 200 μ A. Algunas de sus características son las siguientes:

- Salida de voltaje lineal frente a la humedad relativa.
- Diseño de baja potencia.
- Químicamente resistente.²²

A continuación, se detallan datos del rendimiento, zonas de operación, voltaje de salida y modo de conexión en tablas e imágenes:

Parameter	Minimum	Typical	Maximum	Unit	Specific Note
Interchangeability (first order curve)	–	–	–	–	–
0% RH to 59% RH	-5	–	5	% RH	–
60% RH to 100% RH	-8	–	8	% RH	–
Accuracy (best fit straight line)	-3.5	–	+3.5	% RH	1
Hysteresis	–	3	–	% RH	–
Repeatability	–	± 0.5	–	% RH	–
Settling time	–	–	70	ms	–
Response time (1/e in slow moving air)	–	5	–	s	–
Stability (at 50% RH in a year)	–	± 1.2	–	% RH	2
Stability (at 50% RH in a year)	–	± 0.5	–	% RH	3
Voltage supply	4	–	5.8	Vdc	4
Current supply	–	200	500	μ A	–
Voltage output (1 st order curve fit)	$V_{OUT} = (V_{SUPPLY}) (0.0062(\text{sensor RH}) + 0.16)$, typical at 25 °C				
Temperature compensation	True RH = (Sensor RH)/(1.0546 – 0.00216T), T in °C				
Output voltage temp. coefficient at 50% RH, 5 V	–	-4	–	mV/°C	–
Operating temperature	-40[-40]	See Figure 1.	85[185]	°C[°F]	–
Operating humidity (HIH-4030)	0	See Figure 1.	100	% RH	5
Operating humidity (HIH-4031)	0	See Figure 1.	100	% RH	–
Storage temperature	-50[-58]	–	125[257]	°C[°F]	–
Storage humidity	See Figure 2.			% RH	5

Tabla 3. 2. Tabla de rendimiento del sensor de humedad HONEYWELL HIH-4030 (con alimentación de 5Vdc y 25°C).

Fuente: HIH-4030/31 Series. (2008). Recuperado de <https://www.sparkfun.com>

²² Honeywell, 2008: Pág. 1.

Figura 3. 20. Ambiente de operación del sensor de humedad HONEYWELL HIH-4030.

Fuente: HIH-4030/31 Series. (2008). Recuperado de <https://www.sparkfun.com>

Figura 3. 21. Ambiente de almacenaje del sensor de humedad HONEYWELL HIH-4030.

Fuente: HIH-4030/31 Series. (2008). Recuperado de <https://www.sparkfun.com>

Figura 3. 22. Circuito típico de Aplicación del sensor de humedad HONEYWELL HIIH-4030.

Fuente: HIIH-4030/31 Series. (2008). Recuperado de <https://www.sparkfun.com>

3.5.2 Actuadores

Los actuadores son dispositivos que tienen como objetivo ejecutar una acción en respuesta a una señal de entrada; estas acciones pueden ser mecánicas, eléctricas, neumáticas o hidráulicas.

3.5.2.1 Actuadores utilizados en la tesis

Para el desarrollo de la tesis se han usado tres actuadores; una resistencia de nicrom para aumentar la temperatura, el sistema de refrigeración compuesto por un compresor para disminuir la temperatura y una electrobomba periférica con un aspersor para aumentar la humedad relativa al interior del cuarto húmedo. A continuación, se detallará información de estos actuadores:

3.5.2.1.1 Resistencia de nicrom

La resistencia de nicrom que se ha utilizado se basa en un tubo de porcelana y alambre de nicrom en espiral.

Figura 3. 23. Resistencia de nicrom.

Fuente: Elaboración propia.

3.5.2.1.1.1 Características del tubo de porcelana

- Es de 24cm de largo.
- Tiene 1.4cm de radio exterior y de 0.5cm de radio interior.
- Cuenta con un canal, en todo su contorno, para albergar el alambre de nicrom en espiral.

Figura 3. 24. Tubo de porcelana con canal en su contorno.

Fuente: Elaboración propia.

3.5.2.1.1.2 Características del alambre de nicrom en espiral

- Tiene una resistencia de 75 Ohms.
- Trabajo con 220 Vac.
- Tiene una potencia de 1500 W.

Figura 3. 25. Alambre de nicrom en espiral.

Fuente: Elaboración propia.

3.5.2.1.2 Sistema de enfriamiento

Para bajar la temperatura al interior del cuarto húmedo, se utiliza el sistema de enfriamiento de un compresor, un condensador, un tubo capilar y un evaporador. El funcionamiento es el siguiente:

El compresor mecánico se encarga de elevar la presión del gas refrigerante que se encuentra dentro de un sistema cerrado y hermético; el gas comprimido pasa por un condensador, conducto serpenteante, en donde se enfría y sale como líquido de alta presión. Posteriormente, el líquido pasa por el tubo capilar de donde sale a baja presión con una temperatura menor. Finalmente, el líquido, pasa por el evaporador, conducto con diámetro mayor que el tubo capilar, que por la succión emitida por el compresor, hace que el refrigerante se evapore y se enfríe considerablemente.

El ciclo se reanuda con la succión de vapores, generados por el evaporador, por el compresor.

Figura 3. 26. Sistema de refrigeración de un frigobar.

Fuente: Refrigerador. Recuperado de <http://www.cjdinfo.com.br>

3.5.2.1.3 Electrobomba periférica

La electrobomba periférica ayuda a impulsar el agua almacenada en un tanque dándole una presión y caudal que ayudan a la aspersión de agua dentro del cuarto húmedo. Sus características son las siguientes:

- Marca: Karson
- Potencia: 0.5 HP
- Alcance máximo: 30 m
- Alcance mínimo: 5 m
- Caudal máximo: 30 L/min
- Velocidad del motor: 3450 RPM
- Tipo de conexión: monofásico
- Diámetro de succión: 1"
- Diámetro de descarga: 1"

Figura 3. 27. Electrobomba periférica.

Fuente: Bomba Periférica. Recuperado de <http://www.maestro.com.pe>

3.5.3 Instrumentación Adicional

3.5.3.1 Interruptor termomagnético

El interruptor termomagnético es un dispositivo de protección de circuitos eléctricos que entra en funcionamiento, se abre, ante dos eventos:

- Parte térmica: Actúa cuando se presenta una sobrecarga.
- Parte magnética, Actúa cuando se presenta un cortocircuito.²³

El interruptor termomagnético usado en la tesis es el Schneider Electric iC60N.

Figura 3. 28. Interruptor Termomagnético Schneider Electric iC60N.

Fuente: Interruptores Automáticos Riel iC60N y C120N Schneider. Recuperado de <http://www.jeimel.com>

3.5.3.2 Contactor

El contactor es un interruptor el cual es accionado por un electroimán que retorna a su posición de reposo cuando ya no se ejerce fuerza de accionamiento sobre él. Los contactos

²³ Acomee, 2018: Pág. 1.

que posee el contactor tienen la habilidad de abrir y cerrar circuitos en carga. Cabe resaltar que el contactor no es un dispositivo de protección.²⁴

Los contactores poseen tres partes fundamentales:

- Contactos Principales.
- Contactos Auxiliares.
- Electroimán.

El contactor utilizado para la Tesis es el Schneider Electric LC1D09.

Figura 3. 29. Contactor Schneider Electric LC1D09.

Fuente: Contactor, LC1D09, Schneider Electric. Recuperado de <http://www.elfa.se>

3.5.3.3 Relé

El relé es un interruptor el cual es accionado magnéticamente y se activa o desactiva cuando el electroimán es energizado. Los relés pueden ser normalmente abiertos (NA) y normalmente cerrados (NC):

²⁴ Automatismo Industrial, 2018.

- Relé normalmente abierto (NA): no deja pasar intensidad de corriente cuando hay ausencia de tensión en la bobina ya que se encuentra abierto y deja pasar intensidad de corriente cuando hay presencia de tensión en la bobina.
- Relé normalmente cerrado (NC): Pasa intensidad de corriente cuando hay ausencia de tensión en la bobina ya que se encuentra cerrado y no deja pasar intensidad de corriente cuando hay presencia de tensión en la bobina.²⁵

El relé utilizado para la Tesis es el CAMSCO P226 MY4.

Figura 3. 30. Relé CAMSCO P226 MY4.

Fuente: P226. Especificación de Relé. Recuperado de <http://www.camsco.com.tw>

3.5.3.4 Transmisor de Temperatura TxRail 4-20 mA

Es un dispositivo que tiene como entrada los hilos del PT100 y entrega una salida de 4 a 20mA la cual será conectada a una de las entradas del PLC y pueda ser procesada para el control de Temperatura. El Transmisor tiene que ser configurado a través de un programa sencillo en el cual se escogerán sus parámetros de trabajo.

²⁵ Inesem, 2018.

Figura 3. 31. Transmisor de Temperatura TxRail 4-20 mA.

Fuente: Transmisor TxRail 4-20 mA. Recuperado de <https://www.novusautomation.com>

Figura 3. 32. Conexión de la interface TxConfig USB del Transmisor TxRail 4-20 mA.

Fuente: Transmisor TxRail 4-20 mA. Recuperado de <https://www.novusautomation.com>

Figura 3. 33. Pantalla Principal del software TxConfig del Transmisor TxRail 4-20 mA.

Fuente: Transmisor TxRail 4-20 mA. Recuperado de <https://www.novusautomation.com>

Figura 3. 34. Conexión eléctrica del Transmisor – PT100.

Fuente: Transmisor TxRail 4-20 mA. Recuperado de <https://www.novusautomation.com>

3.5.3.5 Bloque terminal

Los bloques terminales son utilizados para conectar diversas partes de un sistema mediante cables con el fin de mantener un orden y se pueda tener una fácil manipulación para su unión o alimentación.

El bloque terminal utilizado para la Tesis es el TB-1512.

Figura 3. 35. Bloque terminas TB-1512.

Fuente: Conector de Bloques de Terminales. Recuperado de <http://es.aliexpress.com>

3.5.3.6 Fuente de alimentación

La fuente de alimentación es un dispositivo que cumple la función de proporcionar un valor de tensión a aparatos eléctricos y/o electrónicos para su funcionamiento. La fuente de alimentación utilizada en la Tesis es una que convierte tensión alterna en tensión continua. Las etapas de conversión de tensión son transformación, rectificación, filtrado y regulación:

- **Transformación:** Está conformado por una bobina primaria y una o dos bobinas secundarias que tiene como objetivo bajar el nivel de señal alterna.
- **Rectificado:** tiene como objetivo principal rectificar la señal proveniente de la bobina secundaria del transformador mediante el empleo de diodos rectificadores.
- **Filtrado:** Tiene como objetivo principal eliminar la componente de tensión alterna proveniente de la etapa de rectificación mediante el empleo de capacitores.

- **Regulación:** Tiene como función principal conservar las características del sistema mediante el empleo de varios circuitos integrados.²⁶

La fuente de alimentación utilizada para la Tesis es la DELTA DRP024V060W1AZ.

Figura 3. 36. Fuente de alimentación DELTA DRP024V060W1AZ.

Fuente: DRP024V060W1AZ. Recuperado de <http://www.ability-tec.com>

3.6 Controladores

3.6.1 Controlador Lógico Programable (PLC)

El PLC es un dispositivo, de estado sólido, el cual fue diseñado para controlar procesos industriales; es decir, se enlaza a máquinas que desarrollan procesos de producción y controlan su trabajo. El PLC tiene las siguientes funciones:

- Capturar datos desde sus bloques desde entradas digitales y analógicas.
- Decidir en base a criterios programados.
- Almacenar datos en su memoria.

²⁶ López y Tinoco, 2014, Pág. 44-45.

- Generar ciclos de tiempo.
- Efectuar cálculos matemáticos.
- Realizar acciones sobre los dispositivos externos que están conectados mediante el bloque de salidas digitales y analógicas.
- Mantener comunicación con otros sistemas externos.

A diferencia de otros controladores automáticos, que solo pueden controlar máquinas específicas, el PLC puede ser programado para controlar máquina de cualquier tipo. Adicionalmente, tiene las siguientes ventajas:

- Elaboración de proyectos en menor tiempo.
- Se pueden realizar modificaciones sin necesidad de cambiar el cableado o agregar aparatos.
- Ocupa un espacio mínimo.
- El costo de mano de obra para su instalación es menor.
- El costo de mantenimiento es económico.
- Puede controlar varias máquinas a la vez.
- La puesta en funcionamiento del proceso se da en menor tiempo de debido a la reducción del tiempo del cableado.
- El autómata sigue controlando a otras máquinas o sistemas de producción aunque alguna máquina quede fuera de servicio.²⁷

²⁷ Prieto, 2007: Pág. 3.

3.6.1.1 PLC SIEMENS S7-300

El PLC utilizado para el desarrollo de la tesis es el SIMATIC S7-300 el cual es un sistema modular de control de gama media baja de SIEMENS. Además, el PLC cuenta con un CPU 313C.

Figura 3. 37. PLC SIEMENS S7-300.

Fuente: Siemens PLC. Recuperado de <http://dir.indiamart.com>

Las características más resaltantes del PLC S7-300 son:

- Está compuesto por un CPU, un bloque de entradas y un bloque de salidas los cuales se comunican con el programa TIA portal a través de las direcciones de entradas y salida.
- Posee procesadores de comunicación y módulos de funciones para poder realizar tareas especiales como, por ejemplo, el controlador PID.
- El programa almacenado en el PLC puede controlar varias máquinas y procesos a la vez.

- La programación del sistema se puede realizar con el programa TIA portal que es de fácil instalación.²⁸

A continuación, se mostrarán datos técnicos del CPU del PLC:

Datos técnicos	
Memoria RAM	64 KB
Tiempo de ejecución	0,1 µs operaciones de bits 0,24 µs operaciones de palabras 32 µs operaciones de coma fija 1.1 µs operaciones de coma flotante
Contactor	IEC tipo SFB de 256 bytes
Temporizador	IEC tipo SFB de 256 bytes
Bloque de Datos	1024 en total (DBs, FCs, FBs)
OB	16 Kbytes
FB	512 (de FB0 a FB511).
FC	512 (de FC0 a FC511).
Áreas de direccionamiento	- Digitales: 24 entradas (I24.0 a I26.7), 16 salidas (Q24.0 a Q25.7). - Analógicas: 4 + 1 entradas (AI512 a AI516), 2 salidas (AQ512 a AQ515).
Lenguaje de programación	KOP/FUP/AWL
Funciones integradas	Contadores: 4 canales, 24 V/60 kHz. Frecuencímetro: 4 canales, máximo 60 kHz. Salidas de impulso (PCM): 4 canales para modular ancho de pulso, máximo hasta 2,5 kHz. Posicionamiento controlado: 1 canal. Control SFB integrado: Regulador PID.
Alimentación:	24 Vcc (margen admisible: 20,8 V a 28 V). Consumo de corriente nominal: 800 mA. Potencia disipada: tip. 14 W.

Figura 3. 38. Datos técnicos de la CPU del PLC.

Fuente: López, A. y Tinoco, F. (2017). Prototipo de planta industrial de reciclaje de envases multicapa para la fabricación de madera aglomerada. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.

²⁸ López y Tinoco, 2014: Pág. 49-50.

3.6.1.1.1 Estructura externa

Hace alusión al aspecto físico exterior de un PLC. Las dos tendencias que existen en el mercado son las siguientes:

- **Diseño compacto:** Es cuando todos sus elementos como fuente, CPU, entradas/salidas, interfaces, etc. residen en un solo bloque lo cual lo hace, por lo general, más barato, con la desventaja que no se puede ampliar.
- **Diseño modular:** Es cuando todos sus elementos como fuente, CPU, entradas/salidas, interfaces, etc. son bloques independientes que pueden ser unidos, de acuerdo a la necesidad, y configurados para que trabajen en conjunto.²⁹

3.6.1.1.2 Estructura interna

A continuación, se mostrará el esquema de la estructura interna de un PLC para entender mejor su funcionamiento y distinguir los cinco bloques que lo conforman.

Figura 3. 39. Datos técnicos de la CPU del PLC.

Fuente: Cárdenas, Y. (2010). Estructura Externa e Interna de los PLC.

²⁹ Cardenas, 2010: Pág. 4.

3.6.1.1.2.1 Bloque de entradas

Es el encargado de recibir las señales emitidas por los sensores las cuales son adaptadas y codificadas para que el CPU las comprenda. Además, tiene la misión de proteger los circuitos electrónicos internos del PLC mediante la separación eléctrica entre estos y los sensores.

3.6.1.1.2.2 Bloque de salidas

Trabaja de forma inversa al bloque de entradas; es decir, es el encargado de interpretar las órdenes del CPU, las decodifica y, finalmente, las amplifica para enviarlas a los actuadores. Además, posee una interface la cual se encarga de aislar la salida de los circuitos internos.

3.6.1.1.2.3 Unidad Central de Procesamiento (CPU)

Es en esta donde reside la inteligencia del sistema. Las salidas son activadas en función a las instrucciones programadas por el usuario y a los valores de entrada.

3.6.1.1.2.4 Fuente de alimentación

Es la encargada de adaptar la tensión de la red, 220V/60Hz, a valores requeridos por los dispositivos electrónicos internos, que generalmente son de 24Vdc o 5 Vdc.

3.6.1.1.2.5 Interfaces

Son los canales que permiten la comunicación con el exterior. Por ejemplo con:

- Equipos de programación.
- Otros autómatas.
- Computadoras.

3.7 La PC

La PC ha sido un dispositivo esencial para el desarrollo de la tesis ya que es el medio con el cual se pudo desarrollar el sistema a través del software que permite la configuración y

programación del PLC. El software utilizado es el TIA portal V13 y la comunicación entre la PC y el PLC se llevó a cabo con un adaptador MPI a USB.

3.7.1 Unidad Central

Para el desarrollo de la tesis se utilizó una PC de usos Personal de marca Acer de las siguientes características:

- **Modelo:** R3-471T-54T1
- **Edición de Windows:** Windows 8.1
- **Procesador:** Intel® Core(TM) i5-4210U CPU @1.70GHz 2.40 GHz
- **Memoria RAM:** 6.00 GB
- **Capacidad de disco duro:** 1 TB
- **Tarjeta gráfica:** Intel HD Graphics 4400
- **Tipo de sistema:** Sistema operativo de 64 bits, procesador x64

Además, la PC sirve como interfaz gráfica ya que se tiene desarrollado un SCADA el cual ayuda al monitoreo del proceso.

Figura 3. 40. PC Acer R3-471T-54T1.

Fuente: Acer R3 Aspire Touchscreen 14". Recuperado de <http://www.amazon.com.mx>

3.7.2 Comunicación

Para que se puedan comunicar la PC y el PLC se ha utilizado el PC Adapter USB de SIEMENS que es el encargado de conectar la PC con el puerto MPI/DP de un sistema S7/M7/C7 mediante un puerto USB.³⁰

Figura 3. 41. Comunicación entre la PC y el PLC con el PC Adapter USB.

Fuente: PC Adapter USB. (2007). Recuperado de <https://cache.industry.siemens.com>

Las redes en la cuales se puede emplear el PC Adapter USB son MPI y PROFIBUS; además, se puede usar en redes PPI homogéneas a partir de la versión V1.1 de firmware. El PC Adapter USB tiene las siguientes características:

- Detecta, automáticamente, el perfil de bus.
- Puede realizar hasta 16 enlaces de comunicación de los cuales pueden ser 4 esclavos (enlaces DP/T) como máximo.
- Cuenta con soporte de routing.
- Soporta esclavos de norma DPV1, a partir de la versión V1.3 de firmware, mediante:
 - Asignaciones de dirección de esclavo.
 - Diagnóstico de dispositivos.
 - Escribir/leer registros.³¹

³⁰ Siemens, 2007: Pág. 9.

La siguiente tabla detalla las velocidades de transferencia que, el PC Adapter USB, soporta para los distintos tipos de red.³²

Velocidad de transferencia	MPI	PPI	PROFIBUS			
			DP	Estándar	Universal	Personalizado
9.600 bit/s	-	✓	✓	✓	✓	✓
19.200 bit/s	✓	✓	✓	✓	✓	✓
45.450 bit/s	-	-	✓	✓	-	✓
93.750 bit/s	-	-	✓	✓	✓	✓
187.500 bit/s	✓	✓	✓	✓	✓	✓
500 kbit/s	-	-	✓	✓	✓	✓
1500 kbit/s	✓	-	✓	✓	✓	✓

Tabla 3. 3. Tabla de perfiles de bus y velocidades de transferencia.

Fuente: PC Adapter USB. (2007). Recuperado de <https://cache.industry.siemens.com>

Indicaciones y conexiones del PC Adapter USB:

Figura 3. 42. PC Adapter USB – LEDs y puerto MPI/DP.

Fuente: PC Adapter USB. (2007). Recuperado de <https://cache.industry.siemens.com>

³¹ Siemens, 2007: Pág. 10.

³² Siemens, 2007: Pág. 10.

Figura 3. 43. PC Adapter USB – puerto USB.

Fuente: PC Adapter USB. (2007). Recuperado de <https://cache.industry.siemens.com>

CAPÍTULO IV. Descripción de la etapa de software

4.1 Descripción del entorno del software

El presente capítulo tiene como finalidad describir de manera detallada los distintos códigos de programación e interfaces visuales utilizadas en esta Tesis. De esta manera, se busca que el lector logre comprender cómo se ha implementado un sistema capaz de actuar por sí mismo a través de un autómatas. En las siguientes páginas, se proporcionará información acerca de las plataformas utilizadas, así como los bloques de programación, variables consideradas y las respectivas configuraciones.

4.1.1 TIA Portal

El Totally Integrated Automation Portal (TIA Portal) es un innovador sistema que nos permite, como usuarios, crear, diseñar y configurar procesos en el ámbito industrial al integrar diferentes productos SIMATIC (conjunto de software's propietarios de SIEMENS) que interactúan entre sí en una sola aplicación de software que, a través de un entorno más amigable, nos brinda una amplia gama de posibilidades para un mejor soporte y manejo eficiente sobre todas las áreas implicadas para poder crear una solución de automatización dentro de un proyecto de innovación o de mejora continua. Al contar con una nueva generación de editores de programación más productivos se optimiza la calidad, la eficiencia y la consistencia de todo el proceso de producción.

Dentro de todos los software's que el TIA Portal incorpora, el Step7 y el WinCC son de gran utilidad y provecho para el desarrollo de esta tesis, debido a su alta versatilidad en la programación, parametrización, diagnóstico del controlador y pantallas de visualización. Lo antes mencionado nos permite, maximizar la eficiencia en la programación y la calidad de la ingeniería.

Figura 4. 1. Topología de los productos SIMATIC.

Fuente: TIA Portal. Recuperado de <http://www.siemens.com>

4.1.2 SIMATIC Step 7

Este software permite la programación de los controladores lógicos programables (PLC). Está dirigido a la programación de los sistemas de control de los equipos y maquinaria utilizada en procesos de cualquier índole, desde procesos pequeños de manufactura hasta procesos de mayor complejidad como los aplicados en la minería. En la actualidad, su uso en las industrias mundiales es prácticamente masivo.

Adicional a ello, el Step 7 posee la capacidad de constituir redes entre los dispositivos, tales como PROFIBUS, PROFINET, MPI, entre otras. Para conseguir este objetivo, es necesario establecer las direcciones adecuadas para cada dispositivo; de lo contrario, la comunicación será errónea. Así mismo, el usuario tiene la facultad de observar y reconocer si alguno de los dispositivos de la red se encuentra en falla, lo cual genera un ahorro de tiempo, e incrementa la productividad; por otro lado, no menos importante, las facilidades que brinda

a la hora de simular un proceso, así como un diagnóstico en línea del mismo, incrementa considerablemente la confiabilidad del proceso.

4.1.3 SIMATIC WinCC

El WinCC es una plataforma de programación de interfaces visuales dentro del mundo industrial. Básicamente, es un entorno de programación orientado a objetos dentro de un ambiente bastante flexible para el usuario, así como muy robusto dependiendo de las funciones que realizará.

4.2 Desarrollo de la solución

La solución de optimización presentada abarca lo siguiente:

- Un controlador (CPU313C) que controla el proceso con la ayuda de la programación.
- Un panel de operador (KTP1000 Basic Color DP) simulado en la PC con el que se manipula y visualiza el proceso.

Figura 4. 2. Arquitectura de la solución de optimización.

Fuente: Elaboración propia

La solución a la problemática que sugiere la Tesis se va ampliando a medida que se va desarrollando el capítulo. Partiendo de lo más sencillo, en el que sólo se utilizan las funciones básicas del TIA Portal como la creación de un proyecto, configuración del controlador y la creación de una imagen raíz (HMI), hasta funciones cada vez más complejas como la implementación de un regulador PI y el cómo integrarlo al programa.

4.2.1 Diagrama de flujo y tiempo

La solución de automatización que se presenta, se ve estructurada en el siguiente diagrama de flujo.

Figura 4. 3. Diagrama de flujo de la solución.

Fuente: Elaboración propia

Figura 4. 4. Diagrama de tiempo, desde la creación hasta la puesta en marcha del proceso.

Fuente: Elaboración propia

4.2.1.1 Creación del proyecto

La vista general del TIA Portal facilita al usuario poder navegar por las tareas y los datos del proyecto, permitiendo un adecuado uso de herramientas orientada a tareas específicas. Para ello, es posible acceder a las funciones de la aplicación desde distintos ángulos de una manera directa, según las principales tareas que deban realizarse. La siguiente figura muestra la estructura de la vista general del TIA Portal en donde se encontrarán comandos para crear un proyecto nuevo o abrir uno ya existente. El proyecto de la tesis tiene como nombre “Proyecto1_V12_SP1_V13”.

Figura 4. 5. Crear proyecto.

Fuente: Elaboración propia

4.2.1.2 Configuración del hardware

Aquí se muestra cómo insertar un controlador (PLC) y un panel de operador (HMI) desde la vista general del TIA Portal y abrir su configuración en la vista del proyecto. El tipo de controlador y de panel de operador que se crea en el proyecto debe coincidir con el hardware a utilizar para poder cargar más adelante su configuración al mismo sistema físico; sin embargo, de no contar con el hardware en cuestión, se puede simular sus funciones desde el mismo computador. En este caso, usaremos un controlador CPU 313C modelo 6ES7 313-5BF03-0AB0 versión 2.6 al cual llamaremos “PLC_1” y simularemos un panel de operador en el computador KTP1000 Basic Color DP modelo 6AV6 647-0AE11-3AX0 versión 12.0.0.0 al cual llamaremos “HMI_1”.

Figura 4. 6. Agregar controlador.

Fuente: Elaboración propia

Figura 4. 7. Agregar panel de operador.

Fuente: Elaboración propia

En la configuración de ambos, encontramos la ventana de vista de dispositivos, en la se pueden realizar las tareas de configurar y parametrizar dispositivos y también, módulos.

Figura 4. 8. Vista de dispositivos (PLC_1).

Fuente: Elaboración propia

Figura 4. 9. Vista de dispositivos (HMI_1).

Fuente: Elaboración propia

Un aspecto muy importante dentro de la configuración de ambos, es establecer el protocolo de comunicación que ambos elementos usaran para comunicarse entre sí. De esta manera, se establece el protocolo MPI (Interface multipunto) y se asignan las direcciones correspondientes a cada dispositivo, esa dirección será como su identificador. Por cuestiones prácticas, se le ha asignado la dirección número “2” al controlador y la dirección número “1” al panel de operador bajo la subred “MPI_1”. La velocidad de transferencia de las tramas de comunicación entre dispositivos viene por defecto como se muestran en las siguientes figuras.

Dirección MPI _____

Interfaz conectada en red con

Subred:

Parámetros

Dirección:

Dirección más alta:

Velocidad de transferencia:

Figura 4. 10. Dirección MPI del controlador.

Fuente: Elaboración propia

Dirección MPI _____

Interfaz conectada en red con

Subred:

Parámetros

Tipo de interfaz:

Dirección:

Dirección más alta:

Velocidad de transferencia:

Figura 4. 11. Dirección MPI del panel de operador.

Fuente: Elaboración propia

Dentro de la ventana ya mencionada, se tiene acceso a las entradas y salidas análogas y digitales que posee el controlador, así como también, a la configuración de las mismas; asignar direcciones y cambiar propiedades. En la configuración a nivel de periféricos, se ha optado por trabajar con sensores cuyo rango de operación es de 4 a 20 miliamperios a una frecuencia de línea de 60 Hertz, que es el caso del sensor de temperatura, y sensores cuyo rango de operación es de 0 a 10 voltios a una frecuencia de línea de 60 Hertz, como es el caso del sensor de humedad.

Las direcciones de entadas y salidas digitales asignadas del módulo DI24/DO16, se presentan en la siguiente figura.

The image shows a software configuration window titled "Direcciones E/S". It is divided into two main sections: "Direcciones de entrada" and "Direcciones de salida".

Direcciones de entrada:

- Dirección inicial: 124
- Dirección final: 126
- Memoria imagen de proceso: MP OB1 (selected from a dropdown menu)
- Número de OB de alarma: 40 (selected from a dropdown menu)

Direcciones de salida:

- Dirección inicial: 124
- Dirección final: 125
- Memoria imagen de proceso: MP OB1 (selected from a dropdown menu)

Figura 4. 12. Asignación de direcciones digitales.

Fuente: Elaboración propia

Las direcciones de entadas y salidas análogas asignadas del módulo AI5/AO2, se presentan en la siguiente figura.

Direcciones E/S

Direcciones de entrada

Dirección inicial: 52

Dirección final: 61

Memoria imagen de proceso: MPOB1

Número de OB de alarma: 40

Direcciones de salida

Dirección inicial: 52

Dirección final: 55

Memoria imagen de proceso: MPOB1

Figura 4. 13. Asignación de direcciones analógicas.

Fuente: Elaboración propia

Como se hizo mención anteriormente, para anexar los periféricos, se tiene que modificar algunas propiedades referentes a las entradas y salidas análogas. En este caso, se utilizará la entrada “Canal 0” para el sensor de humedad y el “Canal 1” para el sensor de temperatura; para la salida se elegirá la “Salida 0”, en la cual tendremos una salida de 0 a 10 voltios para el control sobre la tarjeta de potencia que controlará el voltaje de alimentación hacia las resistencias quienes cumplirán la función de elevar la temperatura dentro del sistema de curado del concreto.

> Canal 0

Tipo de medición: Tensión

Rango de medición: 0..10 V

Supresión de frecuencias perturbadoras: 60 Hz

Tiempo de integración: 16.6 ms

> Canal 1

Tipo de medición: Intensidad

Rango de medición: 4..20 mA

Supresión de frecuencias perturbadoras: 60 Hz

Tiempo de integración: 16.6 ms

Figura 4. 14. Entradas analógicas a usar.

Fuente: Elaboración propia

Salida 0

Tipo de salida: Tensión

Rango de salida: 0..10 V

Figura 4. 15. Salida analógica a usar.

Fuente: Elaboración propia

Con el objetivo de mantener un orden, se vio la necesidad de generar una tabla de variables, en donde se pueda vincular a cada una de estas señales de entradas y salidas, con su respectiva dirección y el tipo de dato que representa. De esta manera, se declararon las siguientes variables:

	Nombre	Tipo de datos	Dirección	Comentario
1	Manual-Automatico	Bool	%M0.0	Control Manual-Automático del sistema de curado del concreto (HMI)
2	Motor Bomba	Bool	%Q124.0	Salida digital del PLC que acciona el motor de la bomba para el control de humedad dentro del cuarto hermético
3	Start-Stop Bomba	Bool	%M0.1	Control Start-Stop (en manual) de la bomba (HMI), encargada de activar el sistema de aspersión
4	Refrigeracion	Bool	%Q124.2	Salida digital del PLC que acciona el sistema de refrigeración para bajar la temperatura dentro del cuarto hermético
5	Ventiladores	Bool	%Q124.4	Salida digital del PLC que accionan los ventiladores, encargados de recircular el aire dentro del cuarto hermético
6	Sensor H	Int	%IW52	Entrada análoga del PLC en Voltios (V) donde se conecta el sensor de humedad
7	Sensor T	Int	%IW54	Entrada análoga del PLC en miliAmperios (mA) donde se conecta el sensor de temperatura
8	Salida V	Int	%QW52	Salida análoga del PLC en Voltios (V) para el control del voltaje de alimentación de las resistencias
9	On-Off Ventiladores	Bool	%M0.5	Control On-Off (en manual) de los ventiladores (HMI)
10	T Real	Real	%MD2	Temperatura real del proceso dentro del cuarto hermético
11	H real	Real	%MD6	Humedad real del proceso dentro del cuarto hermético
12	Error T	Word	%MW10	Información de error de la temperatura
13	Bipolar T	Bool	%M14.0	Bit bipolar para el cálculo de la temperatura
14	Error H	Word	%MW12	Información de error de la humedad
15	Bipolar H	Bool	%M14.1	Bit bipolar para el cálculo de la humedad
16	SControl T	Real	%MD16	Señal de control de la temperatura
17	Resistencia	Bool	%M15.1	Bit que hace referencia al encendido de las resistencias (HMI), encargadas de elevar la temperatura
18	Error R	Word	%MW28	Información de error de la señal de control hacia las resistencias
19	Bipolar R	Bool	%M14.2	Bit bipolar para el cálculo de la señal de control hacia las resistencias
20	Aux1	Real	%MD24	Auxiliar 1
21	Tag_1	Bool	%M1.0	Tag-auxiliar 1
22	Aux2	Real	%MD30	Auxiliar 2
23	Tag_3	Bool	%M1.2	Tag-auxiliar 3
24	On-Off Refrigeracion	Bool	%M0.6	Control On-Off (en manual) del sistema de refrigeración (HMI)
25	Tag_4	Bool	%M1.3	Tag-auxiliar 4
26	Tag_5	Bool	%M1.4	Tag-auxiliar 5
27	Aux3	DInt	%MD42	Auxiliar 3
28	Tag_6	Bool	%M1.5	Tag-auxiliar 6
29	Tag_2	Bool	%M1.6	Tag-auxiliar 2
30	Tag_7	Bool	%M1.7	Tag-auxiliar 7
31	Tag_8	Bool	%M74.0	Tag-auxiliar 8
32	Tag_9	Bool	%M74.1	Tag-auxiliar 9

Tabla 4. 1. Tabla de variables del proceso.

Fuente: Elaboración propia

Luego de detallar la tabla de variables del proceso se aprecia que se utilizarán 4 entradas no físicas manipuladas desde el HMI, 3 salidas digitales, 2 entradas analógicas y una salida analógica.

4.2.1.3 Conexión en red de los dispositivos

En el editor de dispositivos y redes, nos encontramos con un entorno de desarrollo integrado para parametrizar, configurar y conectar módulos y dispositivos en red. Esta ventana, está formada por una vista de redes y una vista de dispositivos. Es posible desplazarse en todo momento entre ambos editores.

En la vista de redes, se puede verificar como los diferentes dispositivos que pertenecen al mismo proyecto se interconectan, iniciando así, una comunicación entre ellos. Aquí, el usuario podrá observar y reconocer si alguno de los dispositivos de la red se encuentra en falla una vez el proceso se encuentre en línea.

Figura 4. 16. Vista de redes.

Fuente: Elaboración propia

4.2.1.4 Programación del controlador

En la opción de configuración de bloques se crea el OB1 (Main) y el OB35 (CYC_INT5), dentro del cual se podrá dar inicio a la programación de la solución de automatización a partir de segmentos que nos permitirán establecer las pautas del desarrollo de la misma.

4.2.1.4.1 Segmento 1 OB1

Figura 4. 17. Segmento 1 del OB1.

Fuente: Elaboración propia

El segmento 1 muestra la programación de la opción “manual” del sistema de curado de concreto, en donde se tiene el mando de la activación y desactivación, mediante los botones de On-Off, de los sistemas de circulación de aire, aspersión y de refrigeración a través de las variables “Ventiladores”, “Motor Bomba” y “Refrigeración” respectivamente; Se inicializan en “27648” la variable de la señal de salida de voltaje (Salida V) debido a que 0 voltios es su condición inicial ya que hace referencia al apagado del sistema de calefacción; y se resetea el bit que hace referencia al encendido de la resistencia del sistema de calefacción. Estas opciones se pueden realizar desde el HMI y/o SCADA cuando se selecciona la opción manual.

4.2.1.4.2 Segmento 2 OB1

Figura 4. 18. Segmento 2 del OB1.

Fuente: Elaboración propia

El segmento 2 muestra el estado inicial de la programación de la opción “Automático” del sistema de curado de concreto, en donde se mandan a “0” las variables de salida, ya antes mencionadas, y se inicializan las variables auxiliares (Aux1, Aux2 y Ax3), a las cuales se les cargan los resultados de los cálculos matemáticos implicados en esta solución. Se

resetea el bit que hace referencia al encendido de la resistencia del sistema de calefacción como condición inicial.

4.2.1.4.3 Segmento 3 OB1

Figura 4. 19. Segmento 3 del OB1.

Fuente: Elaboración propia

El segmento 3 usa la función “SCALE”, la cual escala la señal de entrada analógica al valor comprendido entre “LO_LIM” y “HI_LIM”. Esta señal, al ser de tipo entero (INT) y de valores positivos, se comprende entre 0 y 27648 cuentas en rango nominal; este último es el valor bruto de variables de 16 bits que tiene el controlador, lo que hace alusión a 16 bits de resolución de entrada. $2^{16} = 65536$ cuentas, en donde de la parte positiva corresponde de 0 a 32768; sin embargo, esto se divide en 3 partes:

- Rebase por exceso – 32512 a 32768
- Rango de saturación – 27649 a 32511
- Rango nominal – 0 a 27648

La señal escalada en este segmento es la señal de temperatura proveniente de un transductor “NOVA” que transforma la señal de resistencia de un PT100 a un valor en miliamperios para proceder a ingresarlos a la entrada analógica “Canal 1” configurada anteriormente de 4 a 20 miliamperios. El valor de cuentas de la temperatura se escala en un rango de 0 a 150°C debido a la programación hecha en el transductor, el cual, dentro de su configuración, traduce el rango de [-200, 600°C] a [4, 20mA]. Este dato real de temperatura se almacena en la variable “T Real”.

Se procede a diseñar la interface de comunicación del transmisor a través del protocolo RS232 para poder enlazarnos con el dispositivo y modificar su configuración. Una vez enlazado se procede a conectar el PT100 para poder escalarlo mediante el software.

4.2.1.4.4 Segmento 4 OB1

Figura 4. 20. Segmento 4 del OB1.

Fuente: Elaboración propia

El segmento 4 usa la función “SCALE” para escalar los valores de entrada análoga del sensor de humedad entre 0 a 10 voltios. Estos rangos de escalamiento se eligieron para representar las cuentas de ingreso en voltajes para luego, a través de un cálculo matemático, encontrar el valor real de la humedad relativa.

El cálculo expresado se rige bajo condiciones normales de 25°C de temperatura. Salida: 0.958V a 0% de humedad, hasta 4.028 Voltios a 100% de humedad relativa.

$$HR = \frac{voltaje - 0.958}{0.0307} \quad (2.52)$$

En donde:

- Zero offset = 0.958V
- Slope = 30.7mV/HR

4.2.1.4.5 Segmento 5 OB1

Figura 4. 21. Segmento 5 del OB1.

Fuente: Elaboración propia

El segmento 5 hace un ajuste de parámetros para brindarnos un “TRUE HR” a partir de la compensación de temperatura dada en el “datasheet” del instrumento para cualquier variación de temperatura en el cuarto de curado de concreto. A través de la siguiente expresión:

$$TRUE\ HR = \frac{HR}{1.0546 - (0.00216\ T)} \quad (2.53)$$

En donde:

- Temperatura en °C = T

4.2.1.4.6 Segmento 6 OB1

Figura 4. 22. Segmento 6 del OB1.

Fuente: Elaboración propia

El segmento 6 describe el accionar digital de la solución de automatización propuesta mostrada en el diagrama de flujo al inicio del capítulo. Primero, se establece que el sistema de refrigeración se activará después de que la temperatura real exceda los 23°C y se mantenga encendido, mientras se vea excedido este límite de temperatura, por 1 hora y apagado por 15 minutos lo cual permitirá un control digital más preciso y sobretodo evitar el sobrecalentamiento del compresor; todo esto se dará al mismo tiempo que el sistema de circulación de aire se encuentre prendido. Durante todo el proceso el sistema de aspersión se encontrará activado hasta que el sensor de humedad relativa indique que se tiene más del 95% de humedad relativa, es ahí en donde el sistema de aspersión, después de 5 segundos de excedido el límite, se detendrá. Por último se observa, que mientras la señal de temperatura sea menor a 23°C, el sistema de circulación de aire y el bit que hace referencia al encendido de las resistencias se activaran indicando que el sistema de calefacción se encuentra operando.

4.2.1.4.7 Segmento 1 OB35

Figura 4. 23. Segmento 1 del OB35.

Fuente: Elaboración propia

El segmento 1 del OB35 hace referencia al FB “CONT_C”, la cual sirve para la regulación de procesos utilizando sistemas de automatización SIMATIC Step 7. El regulador puede aplicarse como regulador PID de consigna fija, autónomo o también en regulaciones de varios lazos como regulador en cascada. Su modo de trabajo se basa en el algoritmo de regulación PID del regulador muestreado con señal de salida analógica, seguidamente por una etapa de formación de impulsos para la creación de señales de salida con modulación de ancho de impulsos para regulaciones de dos o tres puntos con actuadores proporcionales. El FB presentado, en un inicio práctico, realiza un regulador PI con salida continua de magnitud manipulada; posee como entrada el valor de consigna fijo de 23°C (SP_INT), una

ganancia de 2 (GAIN) y una constante integral de 20 segundos (TI). La salida manipulada (SControlIT) se establece dentro de los rangos de 0 a 10 unidades como se puede observar en las variables "LMN_LLM" y "LMN_HLM" respectivamente. Por otro lado, la variable del proceso con la cual se trabaja el regulador PI es el "T real" variable en donde se encuentra la temperatura real del proceso.

Una vez puesto en marcha el regulador, se procede a des escalar la variable manipulada de salida (SControlIT) para expresarla en número de cuentas (Salida V), para que así, el controlador pueda traducir la salida en miliamperios de la siguiente manera:

- SControlIT = 0, entonces "Salida V" = 27658 (0V)
- SControlIT = 10, entonces "Salida V" = 0 (10V)

De esta manera, la salida de 0 a 10V va directamente conectada a la tarjeta de potencia, ya antes descrita, para controlar la tensión de alimentación de las resistencias.

Nota: Es necesario verificar que las variables "P_SEL" y "I_SEL" se encuentren activas, mientras que la variable "D_SEL" inactiva, para garantizar el funcionamiento del regulador PI.

Figura 4. 24. Diagrama de bloques del “CONT_C”.

Fuente: Siemens. (2015). Standard Software for S7-300 and S7-400 PID Control.

4.2.1.5 Configuración de la visualización

La creación de la tabla de variables es definida por el usuario para cada dispositivo HMI, con el fin de agrupar las variables en función de sus necesidades. Es posible borrar, agregar o cambiar el nombre de variables, sin embargo se requiere establecer la conexión con el PLC al cual se va a comunicar para tener privilegios de escritura y/o lectura según sea lo más conveniente. Se muestra a continuación la tabla de variables estándar creada con las

respectivas relaciones entre las variables del PLC y las del entorno del HMI a través de la conexión “Conexión_HMI_1” y el PLC al cual se comunica (PLC_1).

Tabla de variables estándar						
	Nombre ▲	Tipo de datos	Conexión	Nombre PLC	Variable PLC	Dirección
H real	Real	Conexión_HMI_1	PLC_1	"H real"	%MD6
Manual-Automático	Bool	Conexión_HMI_1	PLC_1	"Manual-Automático"	%M0.0
Motor Bomba	Bool	Conexión_HMI_1	PLC_1	"Motor Bomba"	%Q124.0
On-Off Refrigeración	Bool	Conexión_HMI_1	PLC_1	"On-Off Refrigeración"	%M0.6
On-Off Ventiladores	Bool	Conexión_HMI_1	PLC_1	"On-Off Ventiladores"	%M0.5
Refrigeración	Bool	Conexión_HMI_1	PLC_1	Refrigeración	%Q124.2
Resistencia	Bool	Conexión_HMI_1	PLC_1	Resistencia	%M15.1
Start-Stop Bomba	Bool	Conexión_HMI_1	PLC_1	"Start-Stop Bomba"	%M0.1
T Real	Real	Conexión_HMI_1	PLC_1	"T Real"	%MD2
Ventiladores	Bool	Conexión_HMI_1	PLC_1	Ventiladores	%Q124.4

Tabla 4. 2. Tabla de variables HMI.

Fuente: Elaboración propia

Se procede a crear y diseñar las ventanas gráficas para la visualización y manipulación de las variables que intervienen en el proceso. Esto ultimo, se agrega en la opción de “Agregar imagen” dentro la de carpeta de “HMI_1”.

Figura 4. 25. Pantalla principal del HMI.

Fuente: Elaboración propia

4.2.1.6 Carga de datos de configuración

Para cargar de la configuración y programación se requiere cambiar referencia del “Punto de acceso de la aplicación” (S7ONLINE) en “ajustar de interface PG/PC” dentro de “Panel de control” a “PC Adapter MPI.1” para establecer la comunicación entre el PLC y la PC mediante el adaptador USB que transforma el protocolo MPI a USB para que pueda ser reconocido por la computadora.

Figura 4. 26. Ajustar interface PG/PC.

Fuente: Elaboración propia

Para establecer conexión con el dispositivo, se selecciona el tipo de interface requerida “MPI”, la interface en sí “PC Adapter” y la subred creada “MPI_1”. Por último, se selecciona la opción “ver equipos compatibles” y luego se da inicio a la búsqueda de dispositivos.

Figura 4. 27. Establecer conexión con el dispositivo.

Fuente: Elaboración propia

Luego se procede a compilar y cargar en el dispositivo la configuración y programación de la solución.

Figura 4. 28. Vista preliminar de carga al dispositivo.

Fuente: Elaboración propia

Figura 4. 29. Vista de resultados de operación de carga al dispositivo.

Fuente: Elaboración propia

Por último, para establecer la comunicación con el panel de operador y el dispositivo a usar se debe de contar con la siguiente configuración en la ventana de “Configuración Online” del HMI (HMI_1). Indicando el punto de acceso ya antes mencionado “S7ONLINE”.

Figura 4. 30. Comunicación entre HMI y PLC.

Fuente: Elaboración propia

4.2.1.7 Uso de funciones online y diagnóstico

Una de las principales virtudes del SIMATIC Step 7 es el poder ver los procesos de manera online y poder manipular variables de manera directa sin interrumpir el proceso. A continuación algunas ventanas en donde se visualizan las funciones online y con ellas, la facilidad del diagnóstico en tiempo real de cualquiera de las variables influyentes en el proceso.

Figura 4. 31. Vista general online de la programación.

Fuente: Elaboración propia

Proyecto1_V12_SP1_V13 > PLC_1 [CPU 313C] > Variables PLC > Tabla de variables estándar [32]									
Variables									
Constantes de usuario									
Constantes de sistema									
Tabla de variables estándar									
Nombre	Tipo de datos	Dirección	Rema...	VisibL...	Acces...	Valor de observac...	Comentario		
3 Start-Stop Bomba	Bool	%M0.1		☒	☒	FALSE	Control Start-Stop (en manual) de la bomba (HM), encargada de activar el sistema de aspersión		
4 Refrigeracion	Bool	%Q124.2		☒	☒	TRUE	Salida digital del PLC que acciona el sistema de refrigeración para bajar la temperatura dentro del cuart		
5 Ventiladores	Bool	%Q124.4		☒	☒	TRUE	Salida digital del PLC que accionan los ventiladores, encargados de recircular el aire dentro del cuarto h		
6 Sensor H	Int	%IW52		☒	☒	10160	Entrada analoga del PLC en milivolts (mV) donde se conecta el sensor de humedad		
7 Sensor T	Int	%IW54		☒	☒	4368	Entrada analoga del PLC en miliAmperios (mA) para el control del voltaje de alimentación de las resistenc		
8 Salida mA	Int	%QW52		☒	☒	0	Salida analoga del PLC en miliAmperios (mA) para el control del voltaje de alimentación de las resistenc		
9 On-Off Ventiladores	Bool	%M0.5		☒	☒	FALSE	Control On-Off (en manual) de los ventiladores (HM)		
10 T Real	Real	%MD2		☒	☒	23.69792	Temperatura real del proceso dentro del cuarto hermético		
11 H real	Real	%MD6		☒	☒	88.0	Humedad real del proceso dentro del cuarto hermético		
12 Error T	Word	%MW10		☒	☒	16#0000	Información de error de la temperatura		
13 Bipolar T	Bool	%M14.0		☒	☒	FALSE	Bit bipolar para el cálculo de la temperatura		
14 Error H	Word	%MW12		☒	☒	16#0000	Información de error de la humedad		
15 Bipolar H	Bool	%M14.1		☒	☒	FALSE	Bit bipolar para el cálculo de la humedad		
16 SControl T	Real	%MD16		☒	☒	4.0	Señal de control de la temperatura		
17 Resistencia	Bool	%M15.1		☒	☒	FALSE	Bit que hace referencia al encendido de las resistencias (HM), encargadas de elevar la temperatura		
18 Error R	Word	%MW28		☒	☒	16#0000	Información de error de la señal de control hacia las resistencias		
19 Bipolar R	Bool	%M14.2		☒	☒	FALSE	Bit bipolar para el cálculo de la señal de control hacia las resistencias		
20 Aux1	Real	%MD24		☒	☒	87.92859	Auxiliar 1		
21 Tag_1	Bool	%M1.0		☒	☒	TRUE	Tag-auxiliar 1		
22 Aux2	Real	%MD30		☒	☒	87.62955	Auxiliar 2		
23 Tag_3	Bool	%M1.2		☒	☒	TRUE	Tag-auxiliar 3		
24 On-Off Refrigeracion	Bool	%M0.6		☒	☒	FALSE	Control On-Off (en manual) del sistema de refrigeración (HM)		
25 Tiempo R	Time	%MD34		☒	☒	T#55	Tiempo actual del Timer que da paso a la activación del sistema de refrigeración		
26 Tiempo MB	Time	%MD38		☒	☒	T#0MS	Tiempo actual del Timer que da paso a la activación del sistema de aspersión		

Figura 4. 32. Vista general online de la tabla de variables.

Fuente: Elaboración propia

Figura 4. 33. Vista del proceso en automático.

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO V. Pruebas, resultados y validación

5.1 Método de validación

La medida de desempeño más común del concreto, que emplean los ingenieros para diseñar estructuras y edificios, es su resistencia a la compresión. El método que se utiliza para medir la resistencia a la compresión se basa en la fractura de las probetas cilíndricas de concreto en una máquina de ensayos de compresión. Esta medida se obtiene a través del cálculo de la carga de ruptura dividida por el área de la sección que resiste la carga teniendo como unidad la libra de fuerza por pulgada (psi), el mega pascal (MPa) que se utiliza en EE.UU o el kilogramo por centímetro al cuadrado (kg/cm^2) que se utiliza en las pruebas realizadas a las probetas curadas en el cuarto húmedo desarrollado en la tesis.³³

Figura 5. 1. Máquina para determinar la resistencia a la compresión (referencial).

Fuente: Imcyc. (2006). Pruebas de Resistencia a la Compresión del Concreto. Recuperado de

<http://www.imcyc.com>

Figura 5. 2. Proceso de fractura de la probeta cilíndrica de concreto (referencial).

Fuente: Imcyc. (2006). Pruebas de Resistencia a la Compresión del Concreto. Recuperado de

<http://www.imcyc.com>

³³ NRMCA, 2018: Pág. 1.

Para la obtención de la resistencia a la compresión de las probetas curadas en el cuarto húmedo, desarrollado en la tesis, y las probetas curadas, de manera rudimentaria, en la poza de curado del laboratorio de materiales de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), pasaron la prueba de resistencia a la compresión en el laboratorio N°1 de ensayo de materiales “Ing. Manuel Gonzáles De La Cotera” de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).

Algunos datos importantes para obtener el cálculo de la resistencia a la compresión en el laboratorio de la UNI son los siguientes:

- **Equipo utilizado:** Máquina de ensayo uniaxial TONI/TECHNIK
- **Certificado de Calibración del equipo:** LFP-221-2017
- **Método de ensayo:** Norma de referencia NTP 339.034:2015
- **Procedimiento interno:** AT-PR-12

La norma NTP 339.034.2015 es la Norma Técnica Peruana que tiene como título Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas y se encuentra en su 4ª edición.

Los tipos de fractura que se presentan en las probetas de concreto cuando se les realiza la prueba de resistencia a la compresión son: Tipo 1, Tipo 2, Tipo 3, Tipo 4, Tipo 5 y Tipo 6.

Figura 5.3. Fracturas Tipo 1, Tipo 2 y Tipo 3.

Fuente: Palencia, J. (2015). Pruebas de compresión en cilindros de concreto. Universidad Rafael Landívar.

Figura 5. 4. Fracturas Tipo 4, Tipo 5 y Tipo 6.

Fuente: Palencia, J. (2015). Pruebas de compresión en cilindros de concreto. Universidad Rafael Landívar.

5.2 Pruebas y resultados

Para diferenciar las probetas de concreto curadas en el cuarto húmedo y en la poza, se escogieron dos colores de pigmentación. Las probetas rosadas son las que fueron curadas en el cuarto húmedo y las probetas azules son las que fueron curadas en la poza de curado del laboratorio de materiales de la UPC.

Las pruebas de la resistencia a la compresión de todas las probetas de concreto fueron practicadas en el laboratorio N°1 de ensayo de materiales “Ing. Manuel Gonzáles De La Cotera” de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) por el Lic. J. Aburto P. y validadas por la Jefa del laboratorio Ms. Ing. Ana Torre Castillo (ver Anexos). Los resultados fueron los siguientes:

5.2.1 Prueba de resistencia a la compresión 7 días de curado

Azul 1:

- Área del cilindro (cm^2): 176.5
- Carga de ruptura (kg): 53 490
- Tipo de fractura: Tipo 5

- Resistencia a la compresión (kg/ cm²): 304

Rosado 1:

- Área del cilindro (cm²): 176.5
- Carga de ruptura (kg): 60 322
- Tipo de fractura: Tipo 5
- Resistencia a la compresión (kg/ cm²): 342

5.2.2 Prueba de resistencia a la compresión 14 días de curado

Azul 2:

- Área del cilindro (cm²): 176.1
- Carga de ruptura (kg): 57 726
- Tipo de fractura: Tipo 5
- Resistencia a la compresión (kg/ cm²): 328

Rosado 2:

- Área del cilindro (cm²): 176.6
- Carga de ruptura (kg): 62 132
- Tipo de fractura: Tipo 5
- Resistencia a la compresión (kg/ cm²): 352

5.2.3 Prueba de resistencia a la compresión 26 días de curado

Azul 3:

- Área del cilindro (cm²): 176.7

- Carga de ruptura (kg): 59 034
- Tipo de fractura: Tipo 5
- Resistencia a la compresión (kg/ cm²): 334

Rosado 3:

- Área del cilindro (cm²): 182.2
- Carga de ruptura (kg): 65 228
- Tipo de fractura: Tipo 5
- Resistencia a la compresión (kg/ cm²): 358

Tabla resumen de resistencia a la compresión entre probetas curadas en el cuarto húmedo y probetas curadas en la poza de curado del laboratorio de materiales de la UPC:

	Curado a 7 días Resistencia a la compresión (kg/ cm ²)	Curado a 14 días Resistencia a la compresión (kg/ cm ²)	Curado a 26 días Resistencia a la compresión (kg/ cm ²)
Azul	304	328	334
Rosado	342	352	358

Tabla 5. 1. Tabla resumen de los valores obtenidos de resistencia a la compresión de las probetas curadas en el cuarto húmedo (rosadas) y las probetas curadas en la poza de curado del laboratorio de la UPC (azules).

Fuente: Elaboración propia

Figura 5. 5. Resistencia a la compresión de las probetas azules.

Fuente: Elaboración propia

Figura 5. 6. Resistencia a la compresión de las probetas rosadas.

Fuente: Elaboración propia

Figura 5. 7. Resistencia a la compresión de las probetas azules vs rosadas.

Fuente: Elaboración propia

En anexos se mostrará la composición de las muestras de cemento diseñadas en probetas de 15x30 cm y elaboradas por personal del laboratorio de Ing. Civil de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas UPC.

CONCLUSIONES

- Se logró diseñar y construir la estructura del cuarto húmedo, con tablero OSB, de dimensiones de 1.2m de alto, 1.00m de ancho y 0.60m de profundidad el cual cuenta con dos parrillas en su interior las cual servirán para albergar las probetas de concreto y una ventana, ubicada en la parte superior de la pared lateral derecha, que ayuda a liberar el exceso de presión por el aire caliente generado. Además, se logró diseñar la distribución de los sensores y actuadores a utilizar de tal manera que se obtengan lecturas correctas y resultados esperados, de temperatura y humedad relativa, del ambiente dentro del cuarto húmedo.
- Se logró diseñar e implementar el tablero eléctrico y la distribución de los componentes eléctricos a utilizar. El tablero eléctrico está construido de madera rectangular de 40cm x 110cm y cuenta con dos rieles din de 35mm para el montaje de los elementos eléctricos; en el riel din ubicado en la parte superior se montaron el interruptor termomagnético y la fuente de alimentación AC/DC y en el riel din ubicado en la parte inferior se montaron los relés y los contactores. Además, se montaron 5 bloques terminales para conectar, de manera ordenada, el sistema mediante cables. Por último, cuenta con un riel din de 482mm donde se montó el PLC Siemens S7-300.
- Se logró diseñar y confeccionar el circuito de tuberías para el paso de agua que se utilizará en el control de la humedad relativa dentro del cuarto húmedo. El circuito de tuberías se basa en tubos de pvc de 1” que tiene un recorrido desde la parte inferior del cuarto (donde está conectado con la bomba de agua encargada de bombear el agua acumulada en un tanque) hacia el techo del cuarto húmedo para que la aspersión de agua sea en caída desde la parte superior hacia la parte inferior dentro del cuarto húmedo.
- Se logró implementar la tarjeta electrónica de sincronismo para el control de encendido del triac que maneja la corriente de las resistencias encargadas de calentar el ambiente, el circuito se basa en el diseño que se utiliza en el curso de Electrónica de Potencia desarrollado por el Ing. Moisés Gutiérrez Chávez en la universidad UPC. Además, se

logró implementar el sistema de enfriamiento del ambiente dentro del cuarto húmedo para lo cual se utilizó el sistema de enfriamiento de un frigobar.

- Se logró desarrollar el algoritmo de control en el PLC Siemens S7-300 para el control de la temperatura y humedad relativa dentro del cuarto húmedo y un programa SCADA para el monitoreo del proceso para lo cual se utilizó el software TIA portal v13.
- Se logró obtener mejores resultados de resistencia a la compresión en las probetas curadas en el cuarto húmedo que las probetas curadas en la poza de la universidad UPC. Los resultados de resistencia a la compresión obtenidos de las probetas curadas en la poza de la universidad (probetas azules) fueron 304 kg/cm² (curado a 7 días), 328 kg/cm² (curado a 14 días) y 334 kg/cm² (curado a 26 días); mientras que los resultados de resistencia a la compresión obtenidos de las probetas curadas en el cuarto húmedo (probetas rosadas) fueron 342 kg/cm² (curado a 7 días), 352 kg/cm² (curado a 14 días) y 358 kg/cm² (curado a 26 días).
- Cumplidos los objetivos específicos, se logró diseñar e implementar el cuarto húmedo dentro del cual se controla la temperatura y la humedad relativa para que se encuentren dentro de los valores establecidos por la Norma ASTM, $(23 \pm 2) ^\circ \text{C}$ y mayor al 95% de humedad relativa.

RECOMENDACIONES

De la experiencia que se adquirió en el desarrollo de la tesis, se propone realizar mejoras para ser implementadas en futuras construcción de cuartos húmedos. El material utilizado para la estructura del cuarto es el OSB el cual es un material relativamente resistente a la humedad pero que, sin embargo, al exponerse mucho tiempo a una humedad constante, tiende a formarse hongo por lo que se recomienda hacer una nueva evaluación para escoger otro material. Además, el sistema de enfriamiento, utilizado para enfriar el ambiente interno al cuarto, es el de un frigobar de baja capacidad por lo que se demora en enfriar el ambiente; ante este evento, se recomienda usar un sistema de enfriamiento ya no de un frigobar, sino el de una refrigeradora para que la temperatura baje en menos tiempo.

BIBLIOGRAFÍA

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (<http://www.astm.org/index.shtml>) Página web de la ASTM con información sobre las normas que regulan la calidad del concreto. (Consulta: 05 de Enero del 2018)
- INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO (2006) Curado del concreto. Fondo Editorial del IMCYC. México.
- POLANCO RODRÍGUEZ, Abraham (http://fing.uach.mx/licenciaturas/IC/2012/01/26/MANUAL_LAB_DE_CONCRETO.pdf) Manual de Prácticas de Laboratorio de Concreto. (Consulta: 5 de Enero del 2018)
- CONCRETOS SELECTO S.A. (<http://www.coselecto.com/>) Página web de la empresa donde se brinda información sobre el concreto. (Consulta: 5 de Enero del 2018)
- ECURED (<https://www.ecured.cu/Hormigón>) Página web que brinda información acerca de la historia del concreto. (Consulta: 7 de Enero del 2018)
- ARQUBA (<http://www.arquba.com/monografias-de-arquitectura/antecedentes-historicos-del-concreto/>) Página web que brinda información acerca de la historia del concreto. (Consulta: 7 de Enero del 2018)
- BULLÓN VILCHIS, Oscar (2009) Automatización Industrial. Tesis para obtener el título de Ingeniero en Robótica Industrial. Instituto Politécnico Industrial.
- RAMÍREZ SOTO, Carlos (2013) Optimización del consumo de energía en bandas transportadoras por medio de un algoritmo genérico de automatización según la carga definida. Tesis para obtener el título de Ingeniero Mecánico Eléctrico. Universidad de San Carlos de Guatemala.

- ARIAN (<http://www.arian.cl/downloads/nt-004.pdf>) Pt100, su operación, instalación y tablas. (Consulta: 7 de Enero del 2018)
- HONEYWELL (2008) HIH-4030/31 Series Humidity Sensors. USA (<https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Weather/SEN-09569-HIH-4030-datasheet.pdf>)
- SIEMENS (2015) Standard Software for S7-300 and S7-400 PID Control. Alemania (https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/S7pidcob.pdf)
- ACOMEE (<https://www.acomee.com.mx/INTERRUPTOR%20TERMOMAGNETICO.pdf>)
Página web de una tienda mexicana de refacciones para industria.
(Consulta: 15 de Enero del 2018)
- AUTOMATISMO INDUSTRIAL (<https://automatismoidustrial.com/contactores/>)
Página que brinda información de temas de automatización en general.
(Consulta: 15 de Enero del 2018)
- NOVUS (2003) Transmisor TxRail 4-12 mA. Brazil
- INESEM (<https://revistadigital.inesem.es/gestion-integrada/funcionamiento-de-los-tres-tipos-de-reles-mas-utilizados/>) Revista digital que brinda información de dispositivos eléctricos y electrónicos. (Consulta: 15 de Enero del 2018)
- PRIETO LUNS, Paloma (2007) Lenguajes de programación – Principios básicos de PLC
(<http://recursostic.educacion.es/observatorio/web/gl/component/content/article/502-monografico-lenguajes-de-programacion?start=2>) (Consulta: 15 de Enero del 2018)
- LÓPEZ ESPINOZA, Adrián y TINOCO TRUJILLO, Frank (2014) Prototipo de planta industrial de reciclaje de envases multicapa para la fabricación de madera aglomerada.

Tesis para obtener el título de Ingeniero Electrónico. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.

- MORILLA GARCIA, Fernando (2007) El controlador PID. Editorial: Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- CARDENAS RICO, Yair (2010) Estructura Externa e Interna de los PLC
- SIEMENS (2007) PC Adapter USB
(https://cache.industry.siemens.com/dl/files/464/16983464/att_109094/v1/PC_Adapter_USB_e.pdf) (Consulta: 15 Enero del 2018)
- INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO (2010)
(<http://es.scribd.com/doc/26177499/Pruebas-Al-Concreto-Fresco>) Pruebas al concreto fresco (Consulta: 15 de Enero del 2018)
- GUTIERREZ, Jony (2010) Guía de Laboratorio del curso de Tecnología del concreto. Editorial: UPC. Lima. Perú.
- OGATA, Katsuhiko (2003) Ingeniería de control moderna. Madrid: Pearson Educación.
- UNIVERSIDAD NACIONAL DE BOGOTÁ (2010) Ensayos de resistencia a la compresión. Bogotá. Colombia.
- ORTIZ LOZANO, José Angel (2005) Estudio experimental sobre la influencia de la temperatura ambiental en la resistencia del hormigón preparado. Editorial: Universitat Politècnica de Catalunya
- PALENCIA SAMAYOA, José (2015) Materiales de construcción, Laboratorio. Editorial: Universidad Rafael Landívar. Guatemala.
- MAZZONE, Virginia (2002) Controlador PID. Editorial: Universidad Nacional de Quilmes.

- SIKA (2009) Curado del concreto. Editorial: Sika informaciones técnicas (Construcción).
- NRMCA (2012) Concreto en la práctica. Editorial: National Ready Mixed Concrete Association

ANEXOS

Elaboración de las probetas de concreto

1. f'_{cr} 210 kg/cm^2 Slump 6" Pigmento: Azul vs Rosado
- f'_{cr} $210 + 84 = 294 \text{ kg/cm}^2$
- f'_{cr} $294 + 294 \cdot 20\% = 352.8 \text{ kg/cm}^2$

Donde:

f'_{cr} = Resistencias a la compresión

84 = Coeficiente de seguridad

20% = Incremento por aditivos

2. Relación a/c $250 \text{ ----- } 0.62$
- $294 \text{ ----- } X$ $X = a/c = 0.56$
- $300 \text{ ----- } 0.55$

Donde:

a/c = Relación agua-cemento

3. TMN – Slump

Slump = 6"

TMN = 1/2"

Agua = 228 Lt

Donde:

Slump = Consistencia de la mezcla

TMN = Tamaño máximo nominal

4. $a/c = 0.56$ Cemento = 407 kg

5. Aire atrapado $TMN = 1/2" \rightarrow 25\%$

6. Aditivo Euco MR 370 $\gamma = 1200 \text{ kg/m}^3$ Dosis: 0.5% - 15%

$$\text{Aditivo} = 407 \text{ kg} \times 0.65\% = 2.64 \text{ kg}$$

$$\text{Pigmento} = 407 \text{ kg} \times 6\% = 24.42 \text{ kg} \quad \gamma = 2800 \text{ kg/m}^3$$

Donde:

γ = Peso específico

7. Volúmenes absolutos:

	Pesos	Volúmenes
	-----	-----
Cemento:	407 kg	0.1300 m ³
Agua:	228 Lt	0.2280 m ³
Aire:	25%	0.0250 m ³
Aditivo:	2.64 kg	0.0022 m ³
Pigmento:	24.42 kg	0.0087 m ³

		0.3939 m ³

$$8. 1 - 0.3939 \text{ m}^3 = 0.6061 \text{ m}^3$$

$$\text{Ag. Fino (Arena)} = 52\%$$

$$\text{Ag. Grueso (Piedra)} = 48\%$$

$$\text{Arena } (0.6061 \times 52\%) \text{ } 2650 = 835 \text{ kg}$$

$$\text{Piedra } (0.6061 \times 48\%) \text{ } 2670 = 777 \text{ kg}$$

Donde:

Ag. = Agregado

9. Diseño seco:

$$\text{Cemento } 407 \text{ kg}$$

Agua 228 Lt
 Aditivo 2.64 kg
 Arena 835 kg
 Piedra 777 kg
 Pigmento 24.42 kg

10. Corrección de pesos agregados (contenido de humedad)

Arena: $835 \times (1 + C.H.) = 835 (1 + 0.8\%) = 842 \text{ kg}$

Piedra: $777 \times (1 + C.H.) = 777 (1 + 0.3\%) = 779 \text{ kg}$

11. Agua efectiva:

Arena: $835 \times (C.H. + ABS) = 835 (0.8\% - 1.0\%) = -1.67 \text{ Lt}$

Piedra: $777 \times (C.H. + ABS) = 777 (0.3\% - 0.9\%) = -4.66 \text{ Lt}$

Agua = $228 + 1.67 + 4.66 = 234 \text{ Lt}$

Donde:

C.H. = Constante de humedad

ABS = Absorción

	Diseño Seco	Diseño Húmedo	Tanda 35 litros (0.035 m^3)
Cemento	407 kg	407 kg	14.25 kg
Agua	228 Lt	234 Lt	8.19 Lt
Aditivo	2.64 kg	2.64 kg	0.09 kg
Arena	835 kg	842 kg	29.47 kg
Piedra	777 kg	779 kg	27.26 kg
Pigmento	24.42 kg	24.42 kg	0.855 kg

Tabla A. 1. Constitución de la mezcla de la probeta de cemento utilizado.

Fuente: 2018, Lima, Perú: Facultad de Ing. Civil, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.

Figura A. 1. Laboratorio Ing. Civil UPC.

Fuente: Elaboración propia

Figura A. 2. Probetas rosadas a curar en el cuarto húmedo.

Fuente: Elaboración propia

Figura A. 3. Probetas azules curadas de manera artesanal (en la poza de curado) a cargo del personal de Ing. Civil de la UPC.

Fuente: Elaboración propia

Pruebas con el sensor de humedad

A continuación, se presentarán los resultados de las mediciones experimentales que arrojó el sensor de humedad a 23°C.

Voltaje de salida	HR a 23°C
1.112 V	5%
1.265 V	10 %
1.419 V	15%
1.572 V	20%
1.726 V	25%
1.880 V	30%
2.033 V	35%
2.186 V	40%
2.34 V	45%
2.493 V	50%
2.647 V	55%
2.800 V	60%
2.954 V	65%
3.107 V	70%
3.261 V	75%
3.414 V	80%
3.567 V	85%
3.678 V	90%
3.874 V	95%
4.028 V	100%

Tabla A. 2. Resultados de las pruebas hechas con el sensor de humedad relativa.

Fuente: Elaboración propia

Desarrollo del control PI

Figura A. 4. Modo edición de ecuaciones MATLAB.

Fuente: Elaboración propia

Figura A. 5. Modo SIMULINK MATLAB.

Fuente: Elaboración propia

Figura A. 6. Modo osciloscopio MATLAB.

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a las dimensiones del cuarto húmedo, el tiempo de subida al valor de cresta es de 15 segundos; el tiempo de adecuación al valor del “set point” es de 40 segundos; y un sobre amortiguamiento aceptable de 13% por encima del “set point”. No se necesitó del método de Ziegler Nichols para sintonizar los valores del controlador PI de la planta, debido a que se ha modelado toda la planta y se realizaron los cálculos de manera analítica. Se trabajará con una constante proporcional ($P = 0.1$) y una constante integrativa ($I = 10$ seg) como se explicó en el modelo matemático.

Costos

DESCRIPCIÓN	COSTO (S/.)
Tableros de OSB de 30mm de espesor cortados a medida según planos	350.70
La resistencia de nicrom (alambre de nicrom en espiral más tubo de porcelana) (1 unidad)	8.00
Sensor de Temperatura PT100 de dos hilos (1 unidad)	27.00
Sensor de humedad HONEYWELL HIH-4030 (1 unidad)	45.00
Sistema de enfriamiento de frigobar (1 unidad)	249.00
Electrobomba periférica Karson (1 unidad)	79.90
Interruptor Termomagnético Schneider Electric iC60N (1 unidad)	99.90
Contactor Schneider Electric LC1D09 (2 unidades)	160.00
Relé CAMSCO P226 MY4 (3 unidades)	54.00
Transmisor TxRail 4-20 mA Novus (1 unidad)	220.00
Bloque terminas TB-1512 (4 unidades)	32.00
Fuente de alimentación DELTA DRP024V060W1AZ (1 unidad)	120.00
Ventiladores 220V (2 unidad)	60.00
Tablero para la instalación eléctrica (1 unidad)	100.00
Aspersor con accesorios (1 unidad)	7.00
Cable UTP 5ta categoría 5e (5 m)	5.50
Cable 14 AWG (5 m)	6.00
Tanques para agua (2 unidades)	90.00
Riel din (2 m)	13.00
Sistema de tuberías de agua (tubos, codos, tapón, uniones, niples, pegamento, etc)	94.00
Pedazo de jebe de 40cm x 40cm (1 unidad)	5.00
Cubre piso transparente de plástico (1 unidad)	24.00
Fragua (1 km)	5.00
Bisagras de 3" x 3" (6 unidades)	30.00
Pegamento para madera (250 ml)	14.60
Tornillo spax de diversas medidas	12.80
PLC SIEMEN S7-300	1500.00
TOTAL S/.	3412.40

Tabla A. 3. Tabla de costo de materiales y dispositivos utilizados para la construcción del cuarto húmedo.

Fuente: Elaboración propia

Informes de laboratorio

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
Facultad de Ingeniería Civil
LABORATORIO N° 1 DE ENSAYO DE MATERIALES "ING. MANUEL GONZÁLES DE LA COTERA"

Carerra de Ingeniería Civil Acreditada por

Accreditation Board for engineering and Technology

INFORME

Del : Laboratorio N°1 Ensayo de Materiales
A : DESARROLLO, CONSTRUCCION E IMPLEMENTACION DE UN CUARTO HUMEDO A
Obra : ESCALA REDUCIDA PARA EL CURADO DE PROBETAS DE CONCRETO.
Asunto : SUSTENTACION DE TESIS - 7 DIAS
Expediente N° : 18-0712
Recibo N° : 59454
Fecha de emisión : 20/02/2018

1. DE LA MUESTRA : Consistente en 2 probetas cilíndricas de concreto.

2. DEL EQUIPO : Máquina de ensayo uniaxial TONI/TECHNIK.
Certificado de Calibración LFP-221-2017

3. MÉTODO DEL ENSAYO : Norma de referencia NTP 339.034:2015.
Procedimiento interno AT-PR-12.

4. RESULTADOS :

N°	IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS	FECHA DE OBTENCIÓN	FECHA DE ENSAYO	ÁREA (cm²)	CARGA DE MAXIMA (Kg)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Kg/cm²)	TIPO DE FRACTURA
1	AZUL 1	25/01/2018	20/02/2018	176.2	53,490	304	Tipo 5
2	ROSADO 1	25/01/2018	20/02/2018	176.5	60,322	342	Tipo 5

5. OBSERVACIONES: 1) La información referente al muestreo, procedencia, cantidad, fecha de obtención e identificación han sido proporcionadas por el solicitante.

Hecho por : Lic. J. Basurto P.
Técnico : Sr. E.G.V.

Ms. Ing. Ana Torre Carrillo
Jefe (e) del laboratorio

NOTAS:
1) Está prohibido reproducir o modificar el informe de ensayo, total o parcialmente, sin la autorización del laboratorio.
2) Los resultados de los ensayos solo corresponden a las muestras proporcionadas por el solicitante.

UNI-LEM
La Calidad es nuestro compromiso
Laboratorio Certificado ISO 9001

Av. Tupac Amaru N° 210, Lima 25
apartado 1301 - Perú
(511) 381-3343

(511) 481-1070 Anexo: 4058 / 4046

www.lem.uni.edu.pe

lem@uni.edu.pe

Laboratorio de Ensayo de Materiales - UNI

Figura A. 7. Informe de prueba de resistencia a la compresión 7 días de curado (Muestras Azul 1 y Rosado 1).

Fuente: Basurto, J. (2018). Informe de resistencia a la compresión. Universidad Nacional de Ingeniería.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería Civil

LABORATORIO N° 1 DE ENSAYO DE MATERIALES "ING. MANUEL GONZÁLES DE LA COTERA"

Carrera de Ingeniería Civil Acreditada por

Accreditation Board for engineering and Technology

Engineering
Technology
Accreditation
Commission

INFORME

Del : Laboratorio N°1 Ensayo de Materiales
A : DESARROLLO, CONSTRUCCION E IMPLEMENTACION DE UN CUARTO HUMEDO A
Obra : ESCALA REDUCIDA PARA EL CURADO DE PROBETAS DE CONCRETO.
Asunto : SUSTENTACION DE TESIS - 15 DIAS
Expediente N° : Ensayo de Resistencia a la Compresión
Recibo N° : 18-0712-1
Fecha de emisión : 59454
Fecha de emisión : 20/02/2018

1. DE LA MUESTRA : Consistente en 2 probetas cilíndricas de concreto.
2. DEL EQUIPO : Máquina de ensayo uniaxial TONI/TECHNIK.
Certificado de Calibración LFP-221-2017
3. MÉTODO DEL ENSAYO : Norma de referencia NTP 339.034:2015.
Procedimiento interno AT-PR-12.

4. RESULTADOS

N°	IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS	FECHA DE OBTENCIÓN	FECHA DE ENSAYO	ÁREA (cm²)	CARGA DE MAXIMA (Kg)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Kg/cm²)	TIPO DE FRACTURA
1	AZUL 2	25/01/2018	20/02/2018	176.1	57,726	328	Tipo 5
2	ROSADO 2	25/01/2018	20/02/2018	176.6	62,132	352	Tipo 5

5. OBSERVACIONES: 1) La información referente al muestreo, procedencia, cantidad, fecha de obtención e identificación han sido proporcionadas por el solicitante.

Hecho por : Lic. J. Basurto P.
Técnico : Sr. E.G.V.

NOTAS:

- 1) Está prohibido reproducir o modificar el informe de ensayo, total o parcialmente, sin la autorización del laboratorio.
2) Los resultados de los ensayos solo corresponden a las muestras proporcionadas por el solicitante.

Ms. Ing. Ana Torre Carrillo
Jefe (e) del laboratorio

UNI-LEM
La Calidad es nuestro compromiso
Laboratorio Certificado ISO 9001

Av. Tupac Amaru N° 210, Lima 25
apartado 1301 - Perú
(511) 381-3343
(511) 481-1070 Anexo: 4058 / 4046

www.lem.uni.edu.pe

lem@uni.edu.pe

Laboratorio de Ensayo
de Materiales - UNI

Figura A. 8. Informe de prueba de resistencia a la compresión 14 días de curado (Muestras Azul 2 y Rosado 2).

Fuente: Basurto, J. (2018). Informe de resistencia a la compresión. Universidad Nacional de Ingeniería.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA Facultad de Ingeniería Civil

LABORATORIO N° 1 DE ENSAYO DE MATERIALES "ING. MANUEL GONZÁLES DE LA COTERA"

Carrera de Ingeniería Civil Acreditada por

Accreditation Board for engineering and Technology

Engineering
Technology
Accreditation
Commission

INFORME

Del : Laboratorio N°1 Ensayo de Materiales
A : DESARROLLO, CONSTRUCCION E IMPLEMENTACION DE UN CUARTO HUMEDO A
Obra : ESCALA REDUCIDA PARA EL CURADO DE PROBETAS DE CONCRETO.
Asunto : SUSTENTACION DE TESIS - 26 DIAS
Expediente N° : Ensayo de Resistencia a la Compresión
Recibo N° : 18-0712-2
Fecha de emisión : 59454
20/02/2018

1. DE LA MUESTRA : Consistente en 1 probeta cilíndrica de concreto.

2. DEL EQUIPO : Máquina de ensayo uniaxial TONI/TECHNIK.
Certificado de Calibración LFP-221-2017

3. MÉTODO DEL ENSAYO : Norma de referencia NTP 339.034:2015.
Procedimiento interno AT-PR-12.

4. RESULTADOS :

N°	IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS	FECHA DE OBTENCIÓN	FECHA DE ENSAYO	ÁREA (cm²)	CARGA DE MAXIMA (Kg)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Kg/cm²)	TIPO DE FRACTURA
1	AZUL 3	25/01/2018	20/02/2018	176.7	59,039	334	Tipo 5

5. OBSERVACIONES: 1) La información referente al muestreo, procedencia, cantidad, fecha de obtención e identificación han sido proporcionadas por el solicitante.

Hecho por : Lic. J. Basurto P.
Técnico : Sr. E.G.V.

Ms. Ing. Ana Torre Carrillo
Jefe (a) del laboratorio

NOTAS:

- 1) Está prohibido reproducir o modificar el informe de ensayo, total o parcialmente, sin la autorización del laboratorio.
- 2) Los resultados de los ensayos solo corresponden a las muestras proporcionadas por el solicitante.

UNI-LEM
La Calidad es nuestro compromiso
Laboratorio Certificado ISO 9001

Av. Tupac Amaru N° 210, Lima 25
apartado 1301 - Perú
(511) 381-3343
(511) 481-1070 Anexo: 4058 / 4046

www.lem.uni.edu.pe

lem@uni.edu.pe

Laboratorio de Ensayo
de Materiales - UNI

**Figura A. 9. Informe de prueba de resistencia a la compresión 26 días de curado
(Muestra Azul 3).**

Fuente: Basurto, J. (2018). Informe de resistencia a la compresión. Universidad Nacional de Ingeniería.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería Civil

LABORATORIO N° 1 DE ENSAYO DE MATERIALES "ING. MANUEL GONZÁLES DE LA COTERA"

Carrera de Ingeniería Civil Acreditada por

Accreditation Board for engineering and Technology

Engineering
Technology
Accreditation
Commission

INFORME

Del : Laboratorio N°1 Ensayo de Materiales
A : DESARROLLO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN CUARTO HUMEDO A
Obra : ESCALA REDUCIDA PARA EL CURADO DE PROBETAS DE CONCRETO
Asunto : SUSTENTACIÓN DE TESIS - 26 DIAS
Expediente N° : Ensayo de Resistencia a la Compresión
Recibo N° : 18-0791
Fecha de emisión : 69540
: 26/02/2018

1. DE LA MUESTRA : Consistente en 1 probeta cilíndrica de concreto.
2. DEL EQUIPO : Máquina de ensayo uniaxial ELE INTERNATIONAL.
Certificado de Calibración CMC-083-2017
3. MÉTODO DEL ENSAYO : Norma de referencia NTP 339.034:2015.
Procedimiento interno AT-PR-12.
4. RESULTADOS :

N°	IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA	FECHA DE OBTENCIÓN	FECHA DE ENSAYO	ÁREA (cm ²)	CARGA MÁXIMA (Kg)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Kg/cm ²)	TIPO DE FRACTURA
1	ROSADO 3	25/01/2018	26/02/2018	182.2	65,228	358	Tipo 5

5. OBSERVACIONES: 1) La información referente al muestreo, procedencia, cantidad, fecha de obtención e identificación han sido proporcionadas por el solicitante.

Hecho por : Lic. J. Basurto P.
Técnico : Sr. L. O. R.

Ms. Ing. Ana Torre Carrillo
Jefe (e) del laboratorio

NOTAS:

- 1) Está prohibido reproducir o modificar el informe de ensayo, total o parcialmente, sin la autorización del laboratorio.
2) Los resultados de los ensayos solo corresponden a las muestras proporcionadas por el solicitante.

UNI-LEM
La Calidad es nuestro compromiso
Laboratorio Certificado ISO 9001

Av. Tupac Amaru N° 210, Lima 25
apartado 1301 - Perú
(511) 381-3343
(511) 481-1070 Anexo: 4058 / 4046

www.lem.uni.edu.pe

lem@uni.edu.pe

Laboratorio de Ensayo
de Materiales - UNI

Figura A. 10. Informe de prueba de resistencia a la compresión 26 días de curado (Muestra Rosado 3).

Fuente: Basurto, J. (2018). Informe de resistencia a la compresión. Universidad Nacional de Ingeniería.