



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño del sistema de control del deshidratador UDEP de
lecho fluidizado**

Trabajo de Investigación para optar el Grado de
Máster en Ingeniería Mecánico-Eléctrica con mención en Sistemas Eléctricos y
Automatización Industrial

Pedro Antonio Zurita Sánchez

Asesor:
Dr. Ing. Raúl La Madrid Olivares

Piura, marzo de 2023



Raúl La Madrid Olivares
43356179

NOMBRE DEL TRABAJO

**v1 Diseño sistema de control de un proto
tipo de deshidratador.docx**

RECUENTO DE PALABRAS

6998 Words

RECUENTO DE PÁGINAS

80 Pages

FECHA DE ENTREGA

Mar 1, 2023 12:00 PM GMT-5

RECUENTO DE CARACTERES

35551 Characters

TAMAÑO DEL ARCHIVO

10.9MB

FECHA DEL INFORME

Mar 1, 2023 12:02 PM GMT-5**● 22% de similitud general**

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

- 21% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 12% Base de datos de trabajos entregados
- 5% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Bloques de texto excluidos manualmente

Dedicatoria

A Dios, por ser el inspirador y fortaleza necesaria para continuar con uno de mis anhelos más deseados.

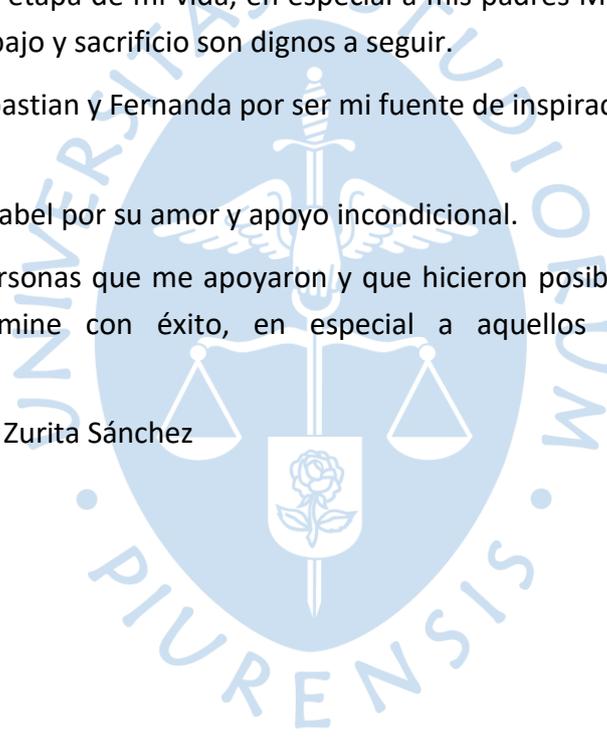
A toda mi familia que con sus oraciones, consejos y palabras de aliento me acompañaron en esta etapa de mi vida, en especial a mis padres Maitel y Pedro que con su ejemplo de amor, trabajo y sacrificio son dignos a seguir.

A mis hijos Sebastian y Fernanda por ser mi fuente de inspiración en todo proyecto de mi vida.

A mi esposa Mabel por su amor y apoyo incondicional.

A todas las personas que me apoyaron y que hicieron posible que este proyecto de investigación se culmine con éxito, en especial a aquellos que compartieron sus conocimientos.

Pedro Antonio Zurita Sánchez





Agradecimientos

El presente estudio se realizó como parte del proyecto de investigación aplicada "Innovación en la operación de secado a través del diseño y automatización de un secador por convección intermitente y su acoplamiento con la Tecnología de Descompresión Instantánea Controlada (DIC) para la valorización sostenible de productos agrícolas de Piura" financiado por PROCIENCIA - Contrato N° PE501079739-2022, Esquema Financiero E041-2022-02.





Resumen

El presente trabajo de investigación presenta el Diseño del sistema de control del deshidratador UDEP de lecho fluidizado. El trabajo está dividido de la siguiente manera.

Cabe resaltar que la investigación se ha realizado con paralelo con la tesis (Cabanillas & Rodas, 2023) dentro del marco del Programa de graduación de la Maestría en Ingeniería Mecánico-Eléctrica. Tanto el señor Aldo Cabanillas, Guillermo Rodas y yo, hemos implementado el secado en la zona de prototipos de la Universidad de Piura.

En el capítulo 1 se presenta el marco teórico del proyecto en el que se detalla la formulación correspondiente al fenómeno de fluidización, transferencia de calor y masa en secadores y el diseño de elementos del sistema de secado por lecho fluidizado.

En el capítulo 2 se muestra todo lo referente a la instrumentación del secador, en el cual se detalla los instrumentos utilizados, la fase de montaje y la interfaz del sistema.

En el capítulo 3 se desarrolla la selección de los componentes del secador prototipo.

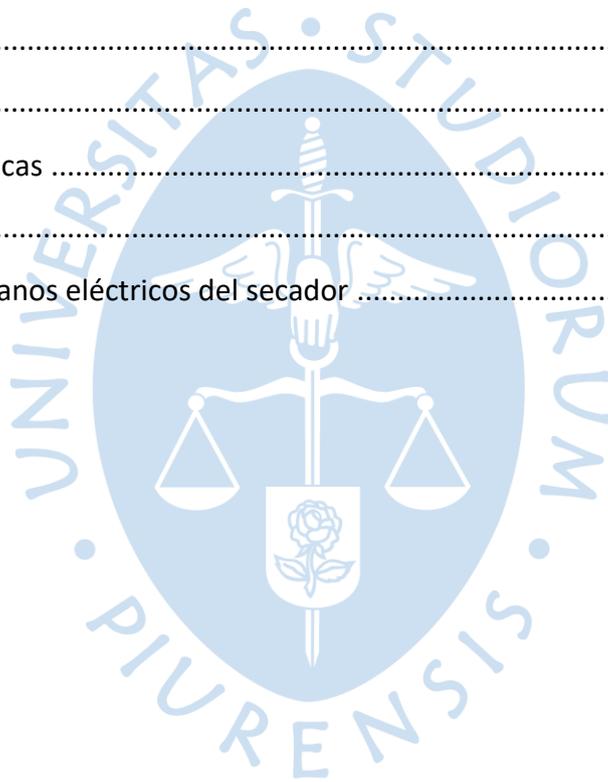
En el capítulo 4 se realizó un trabajo de campo, con lo que se consigue la operatividad del prototipo. Finalmente se culmina mostrando el presupuesto general del equipo.



Tabla de contenido

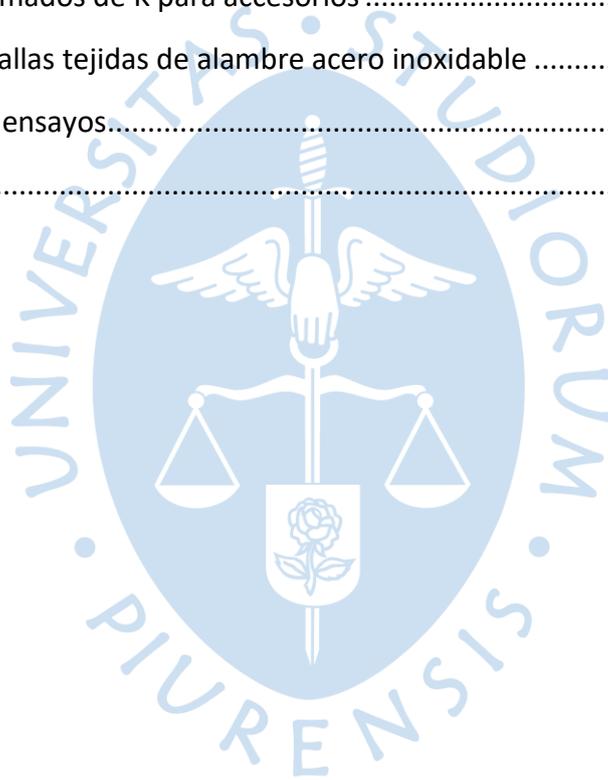
Introducción	15
Capítulo 1 Marco teórico.....	17
1.1 Fluidización	17
1.1.1 Definición.....	17
1.1.2 Proceso de fluidización	17
1.1.3 Velocidad mínima de fluidización.....	18
1.1.4 Velocidad terminal	20
1.1.5 Expansión de lecho	21
1.2 Transferencia de calor y masa en secadores.....	21
1.2.1 Calor necesario para evaporación.....	21
1.2.2 Transmisión de calor en secadores.....	21
1.3 Diseño del ciclón.....	23
1.3.1 Caída de presión en el ciclón	25
1.4 Diseño del ventilador.....	25
1.4.1 Pérdidas primarias o por fricción	25
1.4.2 Pérdidas locales o menores	28
1.4.3 Caída de presión total	32
1.4.4 Potencia accionamiento del ventilador	33
1.5 Diseño del calentador de aire.....	33
Capítulo 2 Instrumentación y control	35
2.1 Instrumentación	35
2.2 Fase instalación equipos.....	39
2.3 Sistema de control.....	42

2.4	Plataforma monitoreo	43
Capítulo 3 Componentes de un secador de lecho fluidizado.....		45
3.1	Cámara de secado o columna de fluidización	45
3.2	Distribuidor	46
3.3	Ciclón	48
3.4	Accesorios y equipos de control.....	48
3.5	Ensamble del secador	48
Capítulo 4 Pruebas experimentales y presupuesto		51
4.1	Pruebas experimentales	51
4.2	Presupuesto	53
Conclusiones.....		55
Referencias bibliográficas		57
Anexos		61
	Anexo A Layout y planos eléctricos del secador	63



Lista de tablas

Tabla 1 Porosidad del empaque.....	18
Tabla 2 Valores de ϵ para tuberías comerciales	28
Tabla 3 Valores aproximados de K para accesorios	29
Tabla 4 Medidas de mallas tejidas de alambre acero inoxidable	32
Tabla 5 Resultados de ensayos.....	51
Tabla 6 Presupuesto	53





Lista de figuras

Figura 1 Caída de presión y altura del lecho vs. velocidad superficial.....	19
Figura 2 Proporciones de un ciclón	24
Figura 3 Volumen de control de flujo estacionario y completamente desarrollado en una tubería rugosa	26
Figura 4 Valores de K para codos	30
Figura 5 Expansión gradual de tubería	31
Figura 6 Termocupla tipo K	35
Figura 7 RTD-PT100	36
Figura 8 Sensor FTS34-4011-0MD	37
Figura 9 Sensor de presión 0-100kPa	37
Figura 10 Variador de frecuencia ATV12HU15M2	38
Figura 11 Laptop DELL XPS	38
Figura 12 Desconexión tableros iniciales	39
Figura 13 Tableros iniciales desmontados	39
Figura 14 Instalación tuberías Conduit	40
Figura 15 Fin de línea tuberías Conduit	40
Figura 16 Instalación tablero de control	41
Figura 17 Descripción equipos tablero de control	41
Figura 18 Distribución de los módulos del PLC	42
Figura 19 Plataforma de monitoreo	43
Figura 20 Pantalla de Mot. Blower	44
Figura 21 Ubicación del prototipo y equipo de trabajo	45
Figura 22 Vista en 3D de la cámara de fluidización.....	46

Figura 23 Imagen del distribuidor de aire	47
Figura 24 Material empaquetadura y malla metálica	47
Figura 25 Imagen del ciclón existente	48
Figura 26 Transmisor FTS34-4011-0MD	48
Figura 27 Prototipo de secador de lecho fluidizado	49
Figura 28 Detalle sistema de admisión de aire	49
Figura 29 Detalle de medición del sensor de aire	50
Figura 30 Fluidización de 1kg de café.....	52
Figura 31 Fluidización de 1.5kg de café.....	52



Introducción

Los secadores de lecho fluidizado o lecho fluido son máquinas muy capaces y versátiles en los procesos de secado de un conjunto de partículas sólidas, esto se debe a que como la partícula está suspendida en la corriente del fluido (mayormente un gas), toda la superficie de la partícula está expuesta permitiendo una mayor transmisión de calor y reduciendo el proceso de secado, sin importar la forma o material que tengan las partículas.

La calidad de este tipo de proceso es relativamente alta, ya que se puede mantener una temperatura homogénea permitiendo un secado uniforme del producto. En este tipo de secadores es necesario contar con sensores como por ejemplo de temperatura y humedad, y otros según la aplicación que se les esté utilizando (por ejemplo, industria química) tanto en la entrada y a la salida del aire, para garantizar la calidad del producto.

También son necesarios el uso de los ciclones o separadores gases-sólidos para evitar la contaminación ambiental, sobre todo en las aplicaciones que se utilizan químicos o que utilicen tamaños de partículas muy pequeñas y generen polvo.

El objetivo general del presente trabajo consiste en diseñar el sistema de control de un secador de lecho fluidizado para deshidratar café.



Capítulo 1

Marco teórico

1.1 Fluidización

1.1.1 Definición

Es el proceso mediante el cual sólidos, de granulometría pequeña, se comportan en conjunto como un fluido manteniéndolos suspendidos por medio de un flujo de gas o en ciertas aplicaciones un líquido (Real Academia Española, 2022).

1.1.2 Proceso de fluidización

Como se ha explicado, la fluidización consiste en mantener suspendidas partículas sólidas en por medio de una corriente de un fluido. Cuando este flujo pasa a través de las partículas con baja velocidad, estas no se levantan y la caída de presión en el lecho de partículas Δp se determina mediante la ecuación de Ergun (ecuación 1), donde z es la altura del lecho, w la velocidad del fluido, μ_f la viscosidad del fluido, ε la porosidad del lecho, φ la esfericidad de la partícula (para partículas esféricas o casi esféricas es igual a 1), D_p el diámetro de partícula y ρ_f la densidad del fluido (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

$$\frac{\Delta p}{z} = \frac{150 w \mu_f (1 - \varepsilon)}{\varphi^2 D_p^2 \varepsilon^3} + \frac{1.75 \rho_f w^2}{\varphi D_p \varepsilon^3} \quad 1$$

Si se aumenta la velocidad progresivamente provoca un aumento de la caída de presión y el rozamiento entre las partículas, pero la altura del lecho permanece invariable, hasta que en algún punto las partículas comienzan a desplazarse y quedan suspendidas en la corriente del fluido. Las expresiones de fluidización y lecho fluidizado se usan para representar el estado cuando las partículas están ya suspendidas y el conjunto de estas se comporten como fluido (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

En la Tabla 1 se pueden ver diferentes valores de ε dependiendo de la forma de la partícula y la relación de diámetro de partícula y diámetro de la cámara D_t . Para nuestro arreglo de $D_p/D_t = 0.125$, obtenemos el valor de la porosidad del lecho de la tabla 2 (ecuación 2)

Tabla 1*Porosidad del empaque*

D_p/D_t	ε para esferas	ε para cilindros
~ 0	0.34	0.34
0.1	0.38	0.35
0.2	0.42	0.39
0.3	0.46	0.45
0.4	0.5	0.53
0.5	0.55	0.6

Nota. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química (2007)

$$\varepsilon = 0.39$$

2

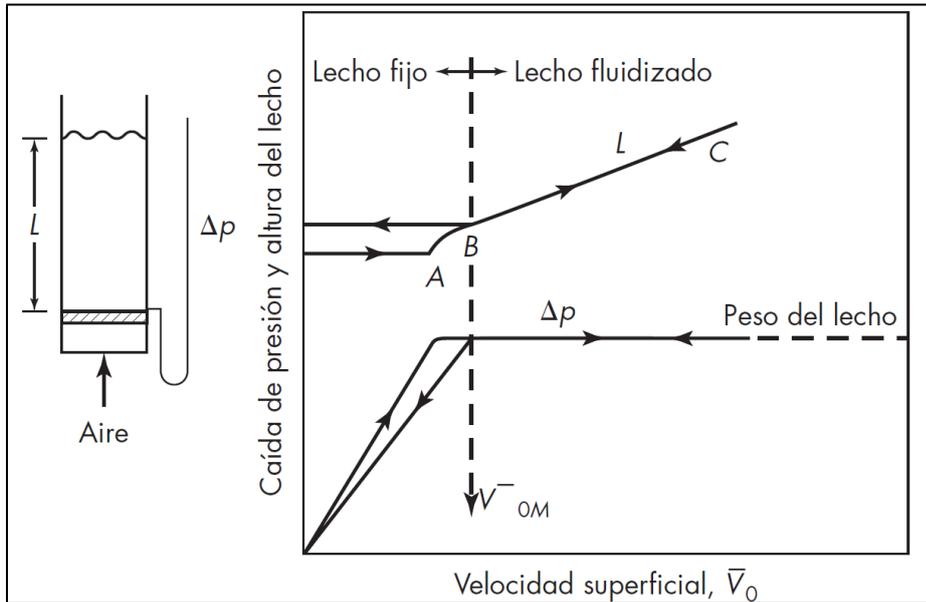
Cuando se llega a la velocidad justo antes de fluidizarse, la caída de presión a través del lecho nivela, ya sea la fuerza de gravedad sobre las partículas o bien el peso del lecho, y un posterior incremento de la velocidad induce el desplazamiento de las partículas. Esto corresponde al punto A de la Figura 1. Incrementando aún más la velocidad, llegando a la velocidad mínima de fluidización, las partículas están bastante separadas entre sí como para poder desplazarse dentro del lecho, ahí es cuando inicia la verdadera fluidización correspondiente al punto B de la figura 1. Siempre, al finalizar la fluidización, la altura final del lecho será mayor que la originaria para el lecho fijo, ya que los sólidos volcados en el tubo suelen empaquetarse mejor que los sólidos que se asientan disminuyendo la velocidad lentamente a partir de un estado fluidizado (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

1.1.3 Velocidad mínima de fluidización

La caída de presión Δp en un lecho de altura z es equivalente al peso del lecho dividido entre el área transversal, considerando la fuerza de flotación del fluido desplazado, siendo ρ_s la densidad del sólido y ρ_f la densidad del gas en la ecuación 3 (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

Figura 1

Caída de presión y altura del lecho vs. velocidad superficial



Nota. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química (2007)

$$\Delta p = g(1 - \varepsilon)(\rho_s - \rho_f)z \quad 3$$

Se comienza calculando la porosidad mínima ε_m , que es ε para la fluidización incipiente, esta depende de la esfericidad de la partícula φ . Así ε_m se puede hallar con la ecuación empírica de Wen y Yu (ecuación 4).

$$\varepsilon_m = \sqrt[3]{\frac{1}{14 \varphi}} \quad 4$$

Por lo tanto, la ecuación 3 en función de la altura del lecho queda como la ecuación 5.

$$\frac{\Delta p}{z} = g(1 - \varepsilon_m)(\rho_s - \rho_f) \quad 5$$

Utilizando la ecuación 5 y la ecuación de Ergun (ecuación 1) se puede hallar la velocidad mínima de fluidización en la ecuación 6.

$$\frac{150 \mu_f w_{mf}(1 - \varepsilon_m)}{\varphi^2 D_p^2 \varepsilon_m^3} + \frac{1.75 \rho_f w_{mf}^2}{\varphi D_p \varepsilon_m^3} = g(\rho_s - \rho_f) \quad 6$$

Esta ecuación es cuadrática lo cual se puede resolver con la fórmula general quedando como la ecuación 1.7.

:

$$w_{mf1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad 7$$

Donde los coeficientes a, b y c se ven en las ecuaciones 8, 9 y 10 respectivamente.

$$a = \frac{1.75 \rho_f}{\varphi D_p} \frac{1}{\varepsilon_m^3} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^4} \right] \quad 8$$

$$b = \frac{150 \mu_f (1 - \varepsilon_m)}{\varphi^2 D_p^2 \varepsilon_m^3} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{s}} \right] \quad 9$$

$$c = -g(\rho_s - \rho_f) \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}^2} \right] \quad 10$$

La ecuación da dos resultados, uno negativo y otro positivo. Por razones físicas, el módulo de la velocidad no puede ser negativa.

Existe otro método para calcular w_{mf} (ecuación 11), el cual consiste en calcular el número de Reynolds de mínima fluidización Re_{mf} , el cual depende el número de galileo N_{Ga} (ecuación 12). Esta fórmula de Re_{mf} es propuesta por Wen y Yu (ecuación 13) (Wen & Yu, 1966).

$$w_{mf} = \frac{Re_{mf} \mu_f}{D_p \rho_f} \quad 11$$

$$N_{Ga} = \frac{D_p^3 \rho_f (\rho_s - \rho_f) g}{\mu_f^2} \quad 12$$

$$Re_{mf} = \sqrt{33.7 + 0.0408 N_{Ga}} - 33.7 \quad 13$$

1.1.4 Velocidad terminal

La velocidad terminal o crítica w_t , que es la velocidad con la que las partículas saldrían disparadas del lecho. Se relaciona con w_{mf} dependiendo del régimen del flujo. Quedando para bajos números de Reynolds de partícula Re_p (ecuación 14) como la ecuación 15 y para $Re_p > 10^3$ como la ecuación 16 (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

$$Re_p = \frac{D_p w_{mf} \rho_f}{\mu_f} \quad 14$$

$$w_t = \frac{8.33 w_{mf} (1 - \varepsilon_m)}{\varphi^2 \varepsilon_m^3} \quad 15$$

$$w_t = \frac{2.32 w_{mf}}{\varepsilon_m^{1.5}} \quad 16$$

1.1.5 Expansión de lecho

Al aumentar la velocidad de la corriente del fluido se aumenta la porosidad del lecho y la altura del lecho, cuya relación se expresa en la ecuación 17.

$$z_2 = z_1 \frac{1 - \varepsilon_1}{1 - \varepsilon_2} \quad 17$$

1.2 Transferencia de calor y masa en secadores

1.2.1 Calor necesario para evaporación

Pasando al cálculo de los parámetros de transferencia de calor, se halla la cantidad de masa de agua a evaporar m_w en la masa de sólidos húmedos m_{s-h} con humedad ϕ_{s1} hasta una humedad ϕ_{s2} con la ecuación 18 y con esta se calcula el calor requerido para evaporar el agua Q con la ecuación 19, el cual debe ser como mínimo el necesario para calentar sólidos y líquidos hasta la temperatura de evaporación T_v , donde $c_{p_{s-h}}$ es el calor específico del sólido húmedo, $\lambda_{@T_v}$ el calor latente de vaporización del agua a la temperatura de vaporización y T^0 la temperatura ambiente.

Si se usa en el flujo un gas de barrido, o el secador es adiabático, T_v es la temperatura de bulbo húmedo del aire T_{wb} . El secado sucede a T_v durante un tiempo considerable, pero con frecuencia luego de un corto periodo de tiempo, la temperatura de los sólidos húmedos se incrementa gradualmente como una zona de sólidos secos que se genera en la superficie como una costra. En la última etapa del secado, la temperatura de las partículas aumenta rápidamente hasta algún valor mayor de T_{a1} (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

$$m_w = m_{s-h}(\phi_{s1} - \phi_{s2}) \quad 18$$

$$Q = m_w c_{p_{s-h}}(T_v - T^0) + m_w \lambda_{@T_v} \quad 19$$

1.2.2 Transmisión de calor en secadores

En un secador adiabático, la tasa de calor transferido a los sólidos y al líquido \dot{Q} , proviene del enfriamiento del gas con flujo másico \dot{m}_g y calor húmedo c_s ; para un secador adiabático continuo el balance de calor conduce a la ecuación 20.

$$\dot{Q} = \dot{m}_g c_s (T_{g1} - T_{g2}) \quad 20$$

Donde T_{g1} y T_{g2} son las temperaturas de entrada y salida del gas respectivamente.

Para los cálculos de secadores, el valor de la tasa de calor transferido a los sólidos y líquidos se define bajo el coeficiente global de transferencia de calor U , el área de

transferencia A y la diferencia media de temperaturas (que no necesariamente es la media logarítmica) ΔT en la ecuación 21.

$$\dot{Q} = U A \Delta T \quad 21$$

Quedando la ecuación del flujo de calor transferido del gas a una sección del lecho para un secador como la ecuación 22, donde U se puede aproximar al valor de coeficiente de transferencia de calor por convección h_{gp} y T_s es la temperatura de los sólidos igual a T_v y T_g es la temperatura del gas (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

$$\dot{m}_g c_s \partial T_g = -U (T_g - T_s) \partial A \quad 22$$

El flujo másico del gas \dot{m}_g se calcula con la ecuación 23 y el calor húmedo del aire con la ecuación 24, donde w_o es la velocidad de operación, A_d el área transversal del distribuidor, ρ_g la densidad del gas, c_{p_g} es el calor específico del gas, $c_{p_{H2O}}$ el calor específico del agua y \mathcal{H} la humedad absoluta del aire.

$$\dot{m}_g = w_o A_d \rho_g \quad 23$$

$$c_s = c_{p_g} + c_{p_{H2O}} \mathcal{H} \quad 24$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección h_{gp} se calcula mediante el número de Nusselt Nu (ecuación 25), la conductividad térmica del gas k_g y el diámetro de partícula. Para Nu (ecuación 26) se calcula el número de Reynolds de partículas Re_p en función de la velocidad de operación w_o (ecuación 25) y el número de Prandtl Pr_g (ecuación 27) (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

$$h_{gp} = \frac{k_g Nu}{D_p} \quad 25$$

$$Nu = 2.0 + 0.6 Re_p^{1/2} Pr_g^{1/3} \quad 26$$

$$Re_p = \frac{w_o D_p \rho_g}{\mu_g} \quad 27$$

$$Pr_g = \frac{\mu_g c_{p_g}}{k_g} \quad 28$$

En algunos secadores, tales como los de transportadores de tornillos sinfín, rotatorios o de lecho fluidizado, es difícil determinar el área efectiva para la transferencia de materia y calor. Tales secadores se diseñan sobre la base de un coeficiente volumétrico de transferencia de calor U_a , donde a es el área de transferencia de calor por unidad de volumen del secador

en [m^2 de área de transferencia/ m^3 de lecho], que es desconocida y normalmente se calcula experimentalmente. La ecuación aplicable es la ecuación 29 donde, V es igual al volumen del secador o del lecho (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

$$\dot{Q} = U_a V \Delta T = U a V \Delta T \quad 29$$

En ocasiones cuando se tiene la porosidad del lecho ε se puede determinar a para partículas esféricas mediante la ecuación 30 (Perry, 2019).

$$a = \frac{6(1 - \varepsilon)}{D_p} \quad 30$$

O para partículas cilíndricas, donde D_c es el diámetro del cilindro y z_c la altura del cilindro con la ecuación 31 (Perry, 2019).

$$a = \frac{4(0.5D_c + z_c)(1 - \varepsilon)}{D_c z_c} \quad 31$$

La ecuación de transferencia de calor del gas (aire) a una sección de altura del lecho para un secador viene expresada en la ecuación 31 donde se puede aproximar $U_a \cong h_{gp} \times a$ y siendo z la altura del lecho.

$$w_o \rho_g c_{p_g} \partial T_g = -U_a (T_g - T_s) \partial z \quad 32$$

Por lo que la ecuación de transferencia de calor se resolvería como la ecuación 33, donde z_o es la altura de operación del lecho.

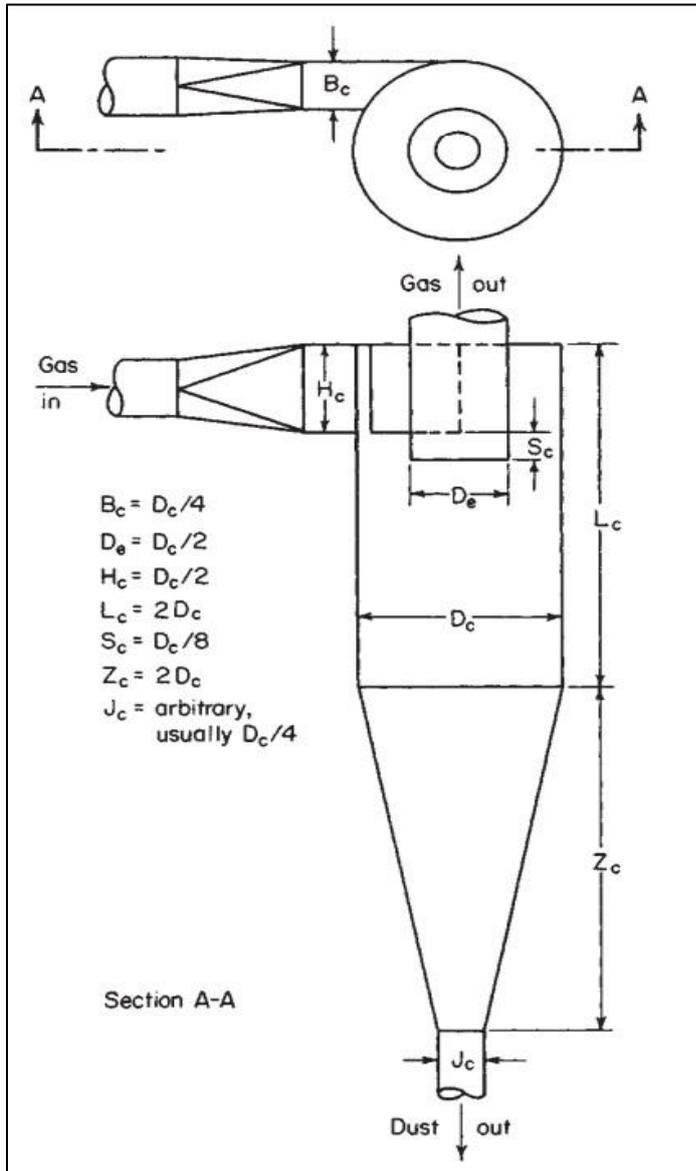
$$\int_{T_{g1}}^{T_{g2}} \frac{1}{(T_g - T_s)} \partial T_g = -\frac{h_{gp} a}{w_o \rho_g c_{p_g}} \int_0^{z_o} \partial z \quad 33$$

1.3 Diseño del ciclón

El ciclón es un separador gas-sólido, que se utiliza para evitar la contaminación del aire del ambiente. En el libro *Perry's Chemical engineer's Handbook* (Perry, 2019) vemos las dimensiones para diseñar un ciclón (ver Figura 2).

Figura 2

Proporciones de un ciclón



Nota. Perry (2019)

Donde a partir del caudal de aire \dot{V} , se puede calcular el área transversal de entrada al ciclón A_c , ya que la velocidad en este punto es igual a la velocidad terminal w_c con la ecuación 34. Con esto, se pueden calcular las dimensiones B_c y H_c de la figura 2 con la ecuación 35.

$$A_c = \frac{\dot{V}}{w_c} \quad 34$$

$$A_c = B_c H_c = \frac{H_c^2}{2} \quad 35$$

1.3.1 Caída de presión en el ciclón

La caída de presión en el ciclón Δp_c (ecuación 36) viene dada por el parámetro empírico de proporcionalidad N_h (ecuación 37) del dimensionamiento de la Figura 2 (Perry, 2019).

$$\Delta p_c = N_h \left(\frac{\rho_g w_c^2}{2} \right) \quad 36$$

$$N_h = \frac{16 H_c B_c}{D_e^2} \quad 37$$

1.4 Diseño del ventilador

Para poder hacer el cálculo de la potencia necesaria del ventilador es necesario primero hacer el cálculo de las pérdidas primarias y secundarias en cada uno de los componentes del secador.

1.4.1 Pérdidas primarias o por fricción

Un fluido que recorre una tubería rugosa en flujo completamente desarrollado (ver figura 3) desarrolla pérdidas por fricción p_f . Estas pérdidas por fricción vienen expresadas en la ecuación de la energía de los fluidos (ecuación 38).

$$\left(p + \frac{\rho w^2}{2} + \rho g z \right)_1 = \left(p + \frac{\rho w^2}{2} + \rho g z \right)_2 + p_f \quad 38$$

De la ecuación de conservación $\dot{V}_1 = \dot{V}_2$, por lo que $w_1 = w_2$, la ecuación 1.38 queda las ecuaciones 39 y 40 respectivamente:

$$(p_1 - p_2) + \rho g (z_1 - z_2) = p_f \quad 39$$

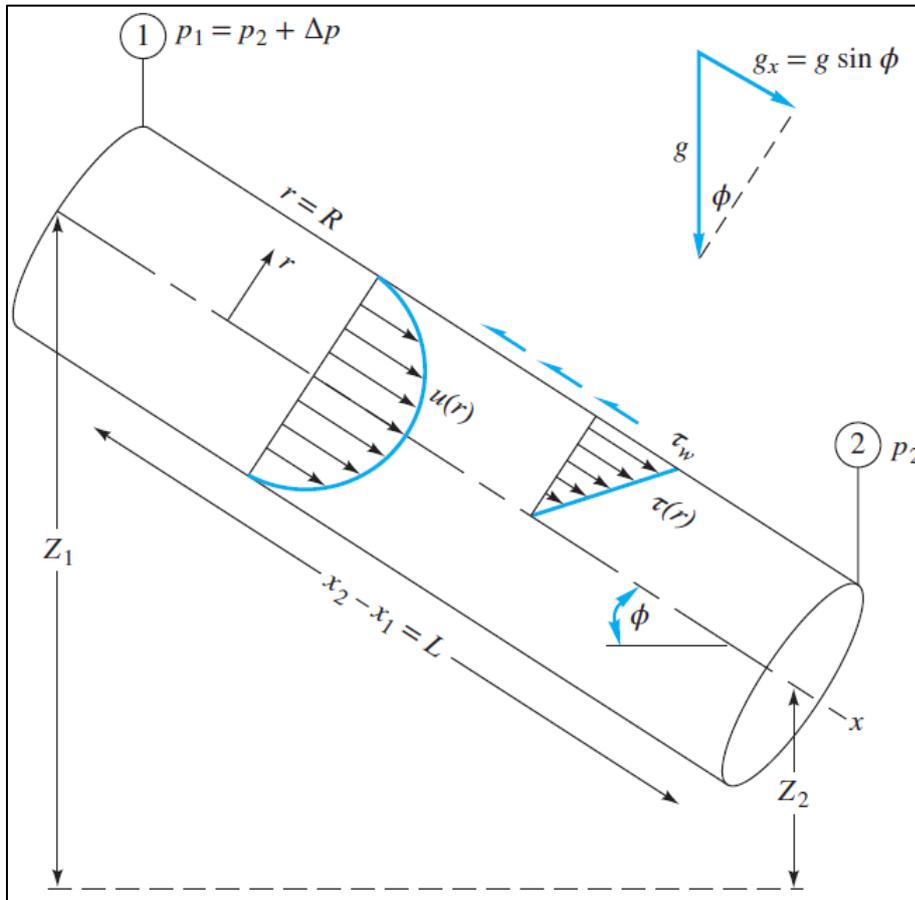
$$\Delta p + \rho g \Delta z = p_f \quad 40$$

Se puede calcular p_f mediante la ecuación de Darcy-Weisbach (ecuación 41) en función de un coeficiente de fricción f , la energía cinética del fluido y la relación longitud L y diámetro de la tubería d .

$$p_f = f \frac{L}{d} \rho \frac{w^2}{2} \quad 41$$

Figura 3

Volumen de control de flujo estacionario y completamente desarrollado en una tubería rugosa



Nota. White & Xue (2021)

En el libro *Engineering Heat Transfer* (Annaratone, 2010) se recomienda que para gases se debe trabajar en función de la densidad en condiciones normales ρ_0 . Donde para el aire en este caso $\rho_0 = 1.293 \text{ kg/m}^3$, quedando la densidad del aire como en la ecuación 42.

$$\rho = \rho_0 \frac{p T_0}{p_0 T} = 3.485 \frac{p}{T} \quad 42$$

Asumiendo una presión p igual a la atmosférica de 101.325 kPa , siendo T la temperatura absoluta del aire, la ecuación 42 resulta como la ecuación 43.

$$\rho = \frac{353.1}{T} \quad 43$$

Reemplazando el valor de la densidad en la ecuación 41, la pérdida por fricción para el aire a presión atmosférica resulta como la ecuación 44.

$$p_f = f \frac{L}{d} \frac{353.1}{T} \frac{w^2}{2} \quad 44$$

El régimen del flujo es importante para poder calcular el coeficiente de fricción de la tubería f . El régimen se determina a partir del número de Reynolds Re_d calculado en la ecuación 45, donde μ es la viscosidad del fluido (aire).

$$Re_d = \frac{d \rho w}{\mu} \quad 45$$

El coeficiente de fricción f se calcula dependiendo si es flujo laminar $Re_d \leq 2000$, quedando f_{lam} como la ecuación 46.

$$f_{lam} = \frac{64}{Re_d} \quad 46$$

Para flujo turbulento $Re_d \geq 3000$, se puede usar la gráfica de Moody o en todo caso la ecuación de Colebrook-White (ecuación 47), el cual es un método iterativo, donde ϵ es la rugosidad del material (ver tabla 2)

$$\frac{1}{\sqrt{f_{tur}}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\epsilon}{3.7 d} + \frac{2.5}{Re_d \sqrt{f_{tur}}} \right) \quad 47$$

El valor inicial $f_{tur,0}$ se da para un $Re_d = \infty$, resultando la ecuación 47 en la ecuación 48.

$$f_{tur,0} = \frac{1}{4 \left(\log_{10} \frac{\epsilon}{d} - 0.568 \right)^2} \quad 48$$

Quedando el valor para cada iteración como la ecuación 49.

$$f_{tur,i} = \frac{1}{4 \log_{10}^2 \left(\frac{\epsilon}{3.7 d} + \frac{2.5}{Re_d \sqrt{f_{tur,i-1}}} \right)} \quad 49$$

En caso de ser tuberías no circulares se debe trabajar con el diámetro hidráulico d_H (ecuación 50) siendo A el área transversal de la tubería y p el perímetro mojado.

$$d_H = \frac{4 A}{p} \quad 50$$

Tabla 2*Valores de ϵ para tuberías comerciales*

Material	Condición	ϵ (mm)
Acero	Chapa metálica, nuevo	0.05
	Inoxidable, nuevo	0.002
	Comercial, nuevo	0.046
	Remachado	3
	Oxidado	2
Hierro	Fundido, nuevo	0.26
	Forjado, nuevo	0.046
	Galvanizado, nuevo	0.15
	Fundición asfaltada	0.12
Bronce	Estirado, nuevo	0.002
Plástico	Tubo estirado	0.0015
Vidrio	-	Liso
Concreto	Alisado	0.04
	Apero	2
Caucho	Alisado	0.01
Madera	Duela	0.5

Nota. White & Xue (2021)**1.4.2 Pérdidas locales o menores**

En cualquier sistema de tuberías, al mismo tiempo que existen pérdidas por fricción, existen pérdidas menores o locales debido a:

- Entrada o salida de un flujo a una tubería
- Expansión o contracción de tubería (gradual o repentina)
- Codos, tees, mallas de alambre y otros accesorios
- Válvulas abiertas o parcialmente cerradas

Las pérdidas menores p_m vienen dadas por el coeficiente adimensional de pérdida menor K , donde el subíndice i indica la sección del diámetro a utilizar (ver ecuación 51).

$$p_m = K_i \frac{\rho w_i^2}{2} \quad 51$$

Al igual que en las pérdidas por fricción, Annaratone (2010) recomienda para gases se debe trabajar en función de la densidad en condiciones normales ρ_0 . Quedando la ecuación 1.51 para el aire a presión atmosférica como la ecuación 52.

$$p_m = K_i \frac{353.1}{T} \frac{w_i^2}{2}$$

Los valores de K para válvulas, codos y tees se pueden ver en la Tabla 3. Para codos, Annaratone (2010), muestra valores de K según el ángulo de curva ω , y la relación de radio de curva r con el diámetro interno de tubería d_i (ver figura 4).

Tabla 3

Valores aproximados de K para accesorios

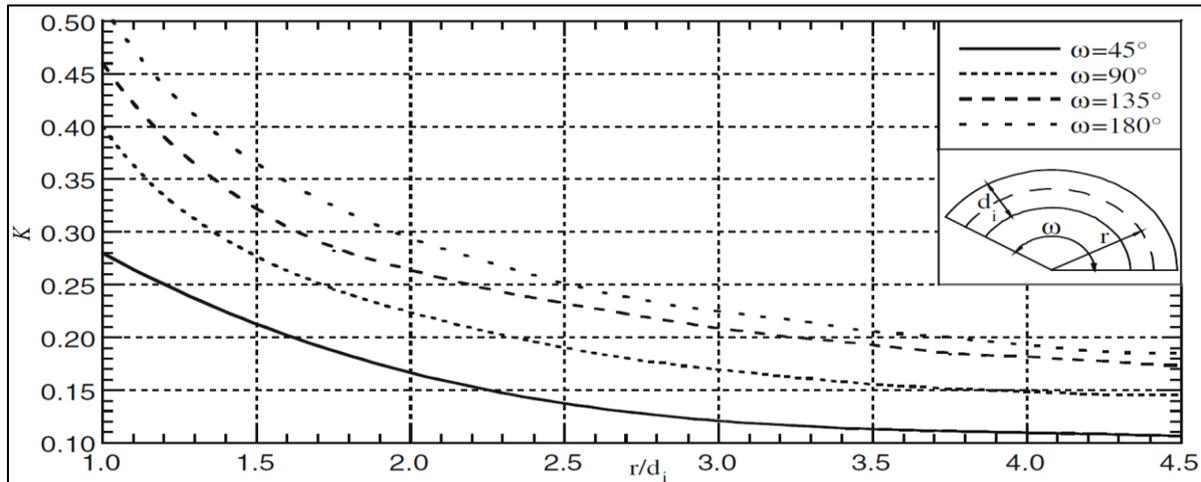
Tipo de accesorio	Diámetro nominal							
	Uniones roscadas				Uniones bridadas			
	1"	2"	3"	4"	1"	2"	3"	4"
Válvulas (completamente abiertas):								
Globo	14	8.2	6.9	5.7	13	8.5	5.8	5.5
Compuerta	0.3	0.24	0.16	0.11	0.8	0.35	0.07	0.03
Retención oscilante	5.1	2.9	2.1	2	2	2	2	2
Ángulo	9	4.7	2	1	2.4	2.4	2	2
Codos:								
45° regular	0.39	0.32	0.3	0.29				
45° radio largo					0.21	0.2	0.16	0.14
90° regular	2	1.5	0.95	0.64	0.5	0.39	0.26	0.21
90° radio largo	1	0.72	0.41	0.23	0.4	0.3	0.15	0.1
180° regular	2	1.5	0.95	0.64	0.41	0.35	0.25	0.2
180° radio largo					0.4	0.3	0.15	0.1
Tees:								
Flujo axial	0.9	0.9	0.9	0.9	0.24	0.19	0.1	0.07
Flujo radial	2.4	1.8	1.4	1.1	1	0.8	0.58	0.41

Nota. White & Xue (2021)

En el caso de contracciones y expansiones, el documento técnico *Flow of Fluids through Valves, Fittings and Pipes* (Crane Co., 2013) nos proporciona ecuaciones para el valor de K. Para expansiones repentinas, donde el subíndice 1 marca la sección del diámetro menor y el subíndice 2 del diámetro mayor K queda como en la ecuación 53.

$$K_1 = \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2}\right)^2$$

53

Figura 4*Valores de K para codos**Nota.* Annaratone (2010)

Para contracciones repentinas como en la ecuación 54:

$$K_1 = 0.5 \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2}\right) \quad 54$$

Se puede trabajar en términos de la sección del diámetro mayor, con la conversión de K_1 a K_2 como en la ecuación 55.

$$K_2 = K_1 \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4 \quad 55$$

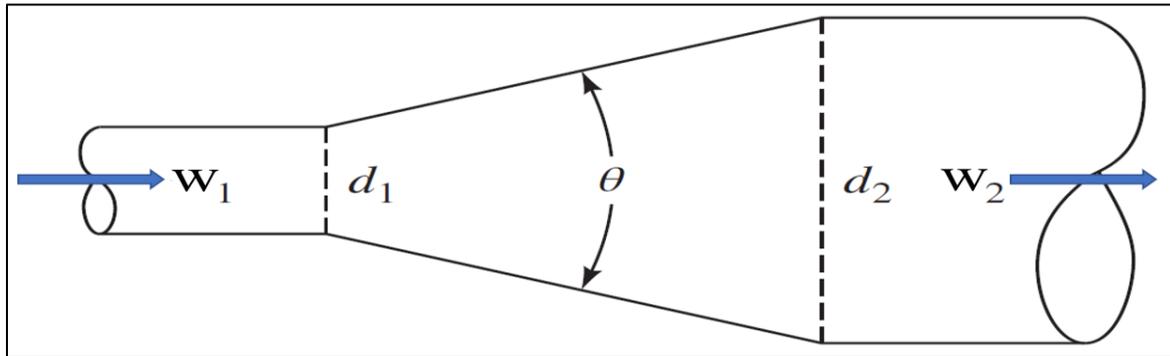
Para expansiones graduales se debe multiplicar la ecuación 53 por el coeficiente C_e quedando como las ecuaciones 56 y 57, donde θ es el ángulo de expansión (ver Figura 5):

$$\theta \leq 45^\circ \rightarrow K_1 = 2.6 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2}\right)^2 \quad 56$$

$$45^\circ < \theta \leq 180^\circ \rightarrow K_1 = \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2}\right)^2 \quad 57$$

Figura 5

Expansión gradual de tubería



Nota. Elaboración propia

De manera similar, para las contracciones graduales se debe multiplicar la ecuación por el coeficiente C_c quedando como las ecuaciones 58 y 59, donde θ es el ángulo de contracción.

$$\theta \leq 45^\circ \rightarrow K_1 = 0.8 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2}\right) \quad 58$$

$$45^\circ < \theta \leq 180^\circ \rightarrow K_1 = 0.5 \sqrt{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2}\right)} \quad 59$$

Para el paso de aire a través de mallas de alambre, el coeficiente K (ecuación 60) viene definido en función de la porosidad de la malla β (ecuación 61), K_0 el coeficiente de resistencia (ecuación 62) a alto número de Reynolds del alambre Re_{al} (ecuación 63) donde se toma la velocidad w como si no existiera malla en la sección de tubería, el coeficiente de contracción C (0.95 para $100 < Re_a < 10000$), el diámetro de alambre d_{al} y el espaciamiento entre alambres s_{al} (de Vahl Davis, 1964). Las medidas de las mallas tejidas de acero inoxidable se pueden observar en la Tabla 4.

$$K = K_0 + \frac{55}{Re_{al}} \quad 60$$

$$\beta = \left(1 - \frac{d_{al}}{s_{al}}\right)^2 \quad 61$$

$$K_0 = \left(\frac{1 - \beta C}{\beta C}\right)^2 \quad 62$$

$$Re_{al} = \frac{w \rho d_{al}}{\mu} \quad 63$$

Tabla 4*Medidas de mallas tejidas de alambre acero inoxidable*

Tamaño de malla		Diámetro de alambre		Apertura	Peso	Tamaño de malla		Diámetro de alambre		Apertura	Peso
/in	/mm	SWG	mm			/in	/mm	SWG	mm		
3	1.18	14	2.20	6.27	7.250	22	8.66	32	0.27	0.880	0.802
3	1.18	16	1.63	6.84	3.950	24	9.45	32	0.27	0.780	0.874
3	1.18	18	1.22	7.25	2.230	26	10.2	32	0.27	0.707	0.947
4	1.57	16	1.63	4.72	5.300	28	11.0	34	0.23	0.677	0.740
4	1.57	18	1.22	5.13	2.950	30	11.8	34	0.23	0.616	0.793
4	1.57	20	0.91	5.44	1.650	32	12.6	34	0.23	0.563	0.846
5	1.96	18	1.22	3.86	3.720	36	14.2	34	0.23	0.475	0.952
6	1.69	20	0.91	3.32	2.480	38	15.0	36	0.19	0.480	0.686
6	1.69	22	0.71	3.52	1.470	40	15.7	36	0.19	0.445	0.722
8	3.15	20	0.91	2.26	3.240	50	19.7	38	0.152	0.356	0.527
8	3.15	24	0.55	2.62	1.210	60	23.6	40	0.122	0.300	0.446
10	3.94	20	0.91	1.63	4.100	80	31.5	42	0.102	0.216	0.416
10	3.94	25	0.50	2.04	1.250	100	39.4	42	0.081	0.173	0.328
12	4.72	22	0.71	1.41	3.020	120	47.2	44	0.081	0.130	0.393
12	4.72	25	0.50	1.62	1.500	150	59.1	46	0.061	0.108	0.280
14	5.52	26	0.46	1.36	1.480	160	63.0	46	0.061	0.097	0.300
14	5.52	28	0.375	1.44	0.984	180	70.9	47	0.051	0.090	0.234
16	6.30	28	0.375	1.21	1.125	200	78.7	47	0.051	0.076	0.260
16	6.30	30	0.315	1.27	0.793	250	98.4	48	0.041	0.061	0.210
18	7.09	30	0.315	1.10	0.893	300	118	49	0.031	0.054	0.144
20	7.87	30	0.315	0.96	0.992	350	138	49	0.031	0.042	0.157
20	7.87	30	0.30	0.97	0.900	400	158	50	0.025	0.0385	0.125
20	7.87	32	0.27	1.00	0.729	500	197	50	0.025	0.0258	0.153

Nota. Xcluder (2022)

1.4.3 Caída de presión total

Por último, la pérdida total de presión en el sistema Δp_t es igual a la suma de las pérdidas por fricción y las pérdidas locales (ecuación 64). Quedando la ecuación de la energía como la ecuación 65.

$$\Delta p_t = p_f + \sum p_m \quad 64$$

$$\left(p + \frac{\rho w^2}{2} + \rho g z \right)_1 = \left(p + \frac{\rho w^2}{2} + \rho g z \right)_2 + \Delta p_t \quad 65$$

1.4.4 Potencia accionamiento del ventilador

La potencia de accionamiento P_{acc} del ventilador está en función a la potencia útil P (ecuación 66) y el rendimiento del ventilador η como se puede ver en la ecuación 67.

$$P = \dot{V} \Delta p_t \quad 66$$

$$P_{acc} = \frac{P}{\eta} \quad 67$$

1.5 Diseño del calentador de aire

La potencia necesaria para calentar el aire viene dada por la ecuación 20 quedando como la ecuación 68.

$$\dot{Q} = \dot{m}_g c_s (T_{g1} - T_{g2}) \quad 68$$





Capítulo 2

Instrumentación y control

2.1 Instrumentación

Los sensores colocados miden principalmente la presión, flujo de aire y temperatura, sin embargo, se cuenta con 2 tipos de sensores para la temperatura.

En la Figura 6 se muestra una imagen de la termocupla del tipo K.

Figura 6

Termocupla tipo K



Nota. Elaboración propia

El rango de trabajo de la termocupla tipo K se encuentra entre los -150°C y 1372°C , la señal llegara al PLC ubicado en el tablero principal.

En la Figura 7 se muestra la RTD-PT100 (CO-04THM).

Figura 7*RTD-PT100*

Nota. Elaboración propia

El rango de trabajo del sensor PT100 se encuentra entre los -200°C y los 800C , la señal llegara al PLC ubicado en el tablero principal (módulos C0-04RTD).

Esto hace un total de 7 sensores de temperaturas ubicados en la columna principal (además de 1 sensor para la temperatura ambiente), el orden en el que se encuentran colocados será el mismo que se mostrará en la interfaz gráfica.

Para medir el flujo de aire se utiliza un sensor a la salida del blower, el modelo usado es FTS34-4011-0MD de la marca EYC-TECH (ver Figura 8), cuenta con un rango de trabajo desde los 0-40 m/s, la alimentación va desde los 8-35VDC y la señal que envía es de 4-20 mA. Además, posee un display que muestra el valor actual del flujo de aire, esta señal llega al módulo C0-04AD-1 del PLC.

Figura 8

Sensor FTS34-4011-OMD



Nota. Elaboración propia

El sensor de presión se encuentra ubicada en la posición 2 de la imagen 02, posee un rango de trabajo de 0 a 100Kpa (manométrico) por lo que el programa toma en consideración la presión atmosférica adicionando el valor correspondiente. La señal que envía el sensor es de 4-20 mA y esta llega al módulo C0-04AD-1 del PLC.

Figura 9

Sensor de presión 0-100kPa



Nota. Elaboración propia

También se cuenta con variador de frecuencia ATV12HU15M2, para regular la velocidad del soplador centrífugo.

Figura 10

Variador de frecuencia ATV12HU15M2



Nota. Elaboración propia

Por último, para la adquisición de datos y control del sistema se ha utilizado una laptop Dell XP con software de control.

Figura 11

Laptop DELL XPS



Nota. Elaboración propia

2.2 Fase instalación equipos

Se realizaron las actividades de instrumentación y automatización para el control de todos los equipos para el secador de lecho fluidizado. Se cuenta con un variador de frecuencia, el controlador lógico programable PLC y las conexiones de los sensores (termocuplas, sensores de presión y caudal).

Figura 12

Desconexión tableros iniciales



Nota. Elaboración propia

Figura 13

Tableros iniciales desmontados



Nota. Elaboración propia

Se instalan tuberías Conduit para las conexiones de equipos y sensores con el tablero de control.

Figura 14

Instalación tuberías Conduit



Nota. Elaboración propia

Figura 15

Fin de línea tuberías Conduit



Nota. Elaboración propia

Finalmente, se instala un único tablero de control.

Figura 16

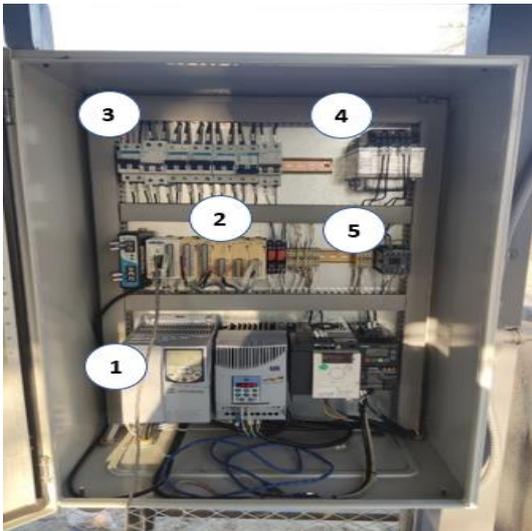
Instalación tablero de control



Nota. Elaboración propia

Figura 17

Descripción equipos tablero de control



- 1 Variadores de frecuencia
- 2 Módulos de PLC
- 3 Llaves térmicas
- 4 Transformador
- 5 Contactor (quemador – para uso quemador)

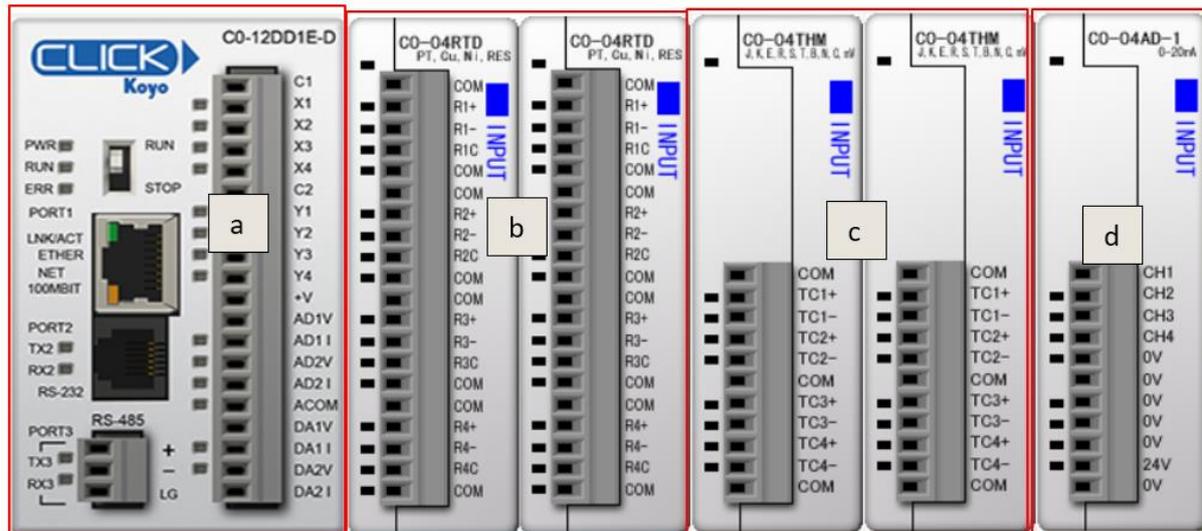
Nota. Elaboración propia

2.3 Sistema de control

Los sensores de temperatura, presión y flujo de aire llegan al PLC, este a su vez permite mostrar los datos de campo a través de la interfaz, así como además poder comandar el blower.

Figura 18

Distribución de los módulos del PLC



Nota. Elaboración propia

a. La CPU del PLC cuenta con entradas y salidas digitales, así como entradas y salidas analógicas (0-5V y 4-20mA), cuenta además con 3 puertos de comunicación, el puerto ethernet (primer puerto) es el usado para establecer la comunicación entre el PLC y la PC, mientras que el puerto RS-485 (tercer puerto) es el usado para la comunicación MODBUS con los variadores de frecuencia.

b. Los 2 primeros módulos son para los sensores de temperatura del tipo RTD-PT100, en cada módulo pueden conectarse hasta 4 sensores de temperatura.

c. Los siguientes 2 módulos son para los sensores de temperatura (termocoplas del tipo K), en cada módulo pueden conectarse hasta 4 sensores de temperatura.

d. En el último módulo se encuentran conectados el sensor de presión y el sensor de flujo (ambas señales de 4-20 mA), en este módulo se pueden conectar hasta 4 sensores con una señal 4-20 mA.

En la parte de los actuadores, se cuenta con 1 variador de frecuencia comandado mediante MODBUS (utilizando el puerto RS-485 del PLC).

El blower es comandado por un variador de frecuencia Altivar ATV 12 de la marca Schneider, al variar la frecuencia de este (la cual va desde 0 a 60 Hz) se varia también el flujo

de aire que ingresa al gasificador siendo esto visible en el sensor de flujo a la salida (el control es realizado por MODBUS).

Tanto los datos de los sensores, así como el accionamiento de los distintos equipos es visualizado por la interfaz de usuario.

2.4 Plataforma monitoreo

La información se presenta tal cual se puede visualizar en la Figura 19.

Figura 19

Plataforma de monitoreo



Nota. Elaboración propia

Al hacer clic en el botón “Mot.Blower” se abrirá un pop-up desde el cual podemos comandar la válvula estelar

Figura 20

Pantalla de Mot. Blower



Nota. Elaboración propia

En el lado izquierdo del pop-up se muestran los principales valores del motor de la válvula estelar (voltaje, corriente y frecuencia del motor) así como el estado en el que se encuentra (encendido/apagado y manual/automático). Del lado derecho del pop-up se establece el valor de la frecuencia del motor (de 0 a 60 Hz), encender/apagar la válvula estelar (on/off), así como cambiar su estado de manual/automático (M/A).

Nota: Cuando el equipo se encuentra en estado automático este no podrá ser comandado mediante los botones "ON" y "OFF", por lo que, para poder comandarlo nuevamente, se deberá cambiar el estado a manual (M).

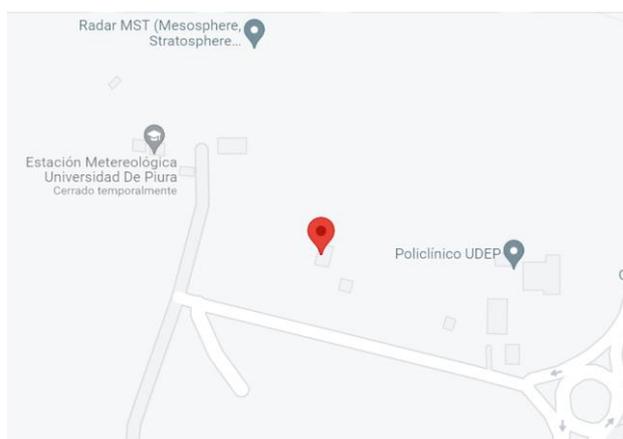
Capítulo 3

Componentes de un secador de lecho fluidizado

En la Figura 21, se adjunta imagen de la ubicación del prototipo y del grupo de trabajo.

Figura 21

Ubicación del prototipo y equipo de trabajo



Nota. Google maps (s.f.)

3.1 Cámara de secado o columna de fluidización

Las características de la cámara de secado o columna de fluidización son las siguientes:

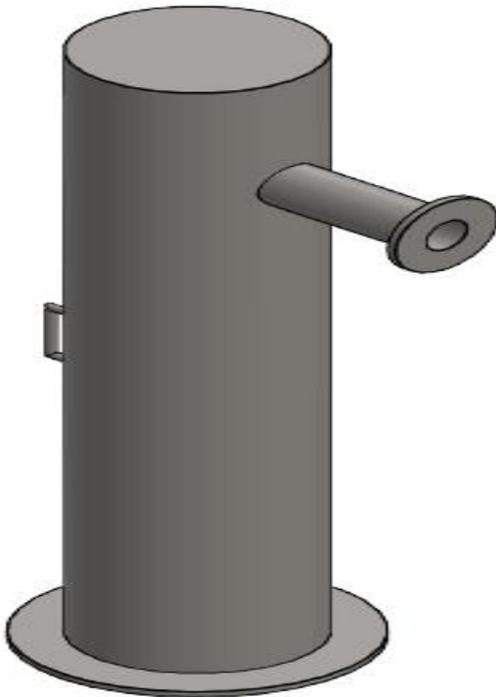
- Material: Acrílico de 10mm de espesor, con el objetivo de poder visualizar el fenómeno de fluidización y a la vez que este sea resistente mecánicamente.
- Se considera en 215 mm.
- Para la facilidad del ingreso del café, incorporamos una puerta de acceso a una altura que facilite suficiente espacio para la fluidización. Así mismo se incorporó un jebe de sellado.
- Consideramos un ducto de salida de partículas residuo, en la parte superior que conecta al ciclón.
- Para el proceso de ensamble se consideró las medidas adecuadas de la brida de ingreso a la cámara (inferior) y de la brida de salida a nuestro cicló de partículas de residuo.

- En la parte superior la cámara es sellada.
- El diseño se ajustó a la disponibilidad técnica de nuestros proveedores de materiales y manufactura.

Lo desarrollado se muestra en la Figura 22:

Figura 22

Vista en 3D de la cámara de fluidización



Nota. Elaboración propia

3.2 Distribuidor

El equipo de investigadores consideró construir un distribuidor, para lo cual consideramos:

- Material: Acero ASTM A36 con de 2 mm de espesor, considerando que este sea resistente mecánicamente.
- Codo de 2" a 90°.
- Cambio de diámetros de los ductos de 2" a 215 mm con una altura de cono de 200mm, respetando la geometría de la brida de acople de la cámara de fluidización.
- Consideramos una perforación y base para la colocación de un sensor de velocidad de flujo de aire.
- Soporte trípode de estabilización de distribuidor en piso.
- Pintado general del distribuidor.

En la Figura 23 se muestra una imagen del equipo en cuestión:

Figura 23

Imagen del distribuidor de aire

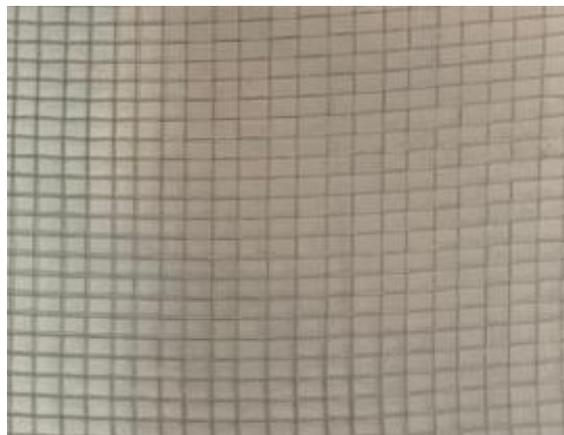


Nota. Elaboración propia

Entre la salida del distribuidor y la cámara de fluidización se coloca una empaquetadura de Flexrite; y una malla metálica soporte de 12 x 9 / pulgada (2.82x2.12 mm), para el café a fluidizar, seleccionado considerando que el grano de café a ensayar es de $d_{eq} = 10.26 \text{ mm}$. Ambos elementos se pueden visualizar en la Figura 24.

Figura 24

Material empaquetadura y malla metálica



Nota. Elaboración propia

3.3 Ciclón

Un ciclón cumple la función de separar las partículas de desecho de la fluidización de los granos, y por otro lado sirve también como instrumento de control de la polución del aire.

Imágenes del ciclón utilizado se muestran en la Figura 25. Cabe resaltar que este equipo ya se encontraba diseñado y construido puesto era parte del sistema gasificador, el cual fue otro proyecto ejecutado por la Universidad.

Figura 25

Imagen del ciclón existente



Nota. Elaboración propia

3.4 Accesorios y equipos de control

Hemos requerido para nuestro prototipo los siguientes accesorios:

- Transmisor de velocidad de aire FTS34-4011-0MD

Figura 26

Transmisor FTS34-4011-0MD



Nota. Elaboración propia

3.5 Ensamble del secador

En la Figura 27 se muestra el prototipo de secador de lecho fluidizado:

Figura 27

Prototipo de secador de lecho fluidizado

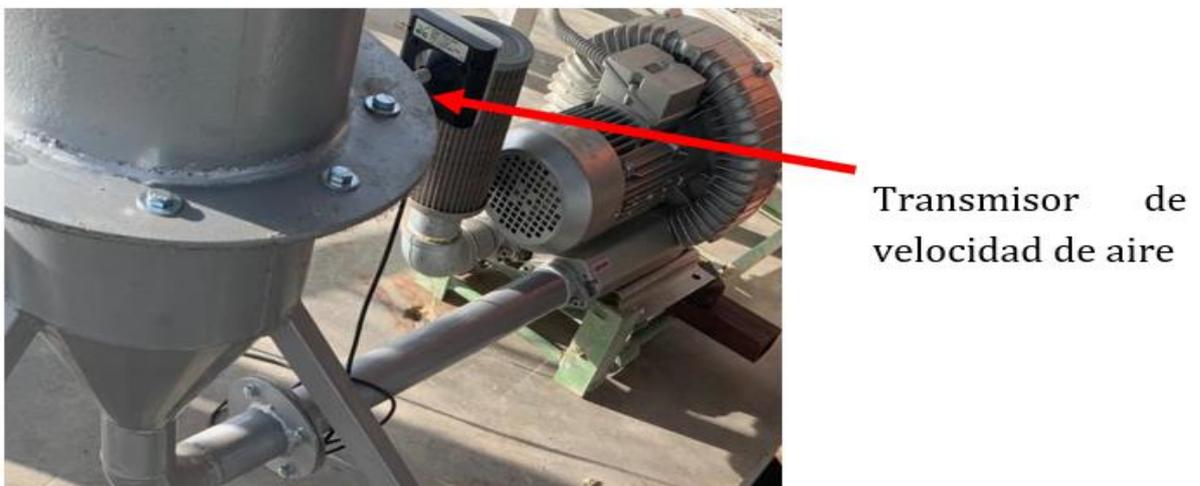


Nota. Elaboración propia

En la figura 28 se muestra un detalle del sistema de admisión.

Figura 28

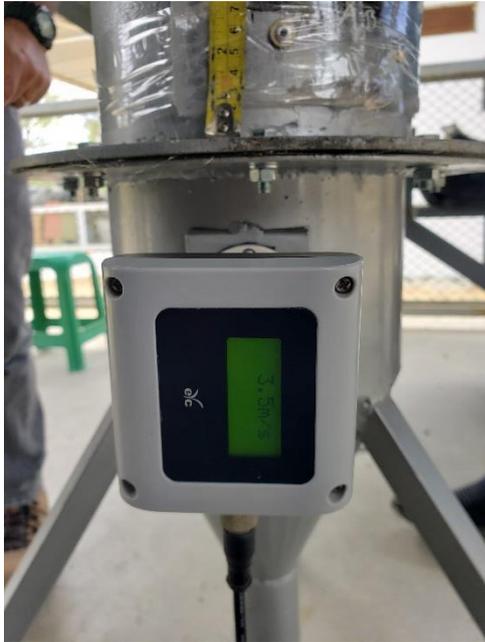
Detalle sistema de admisión de aire



Nota. Elaboración propia

Figura 29

Detalle de medición del sensor de aire



Nota. Elaboración propia

Capítulo 4

Pruebas experimentales y presupuesto

4.1 Pruebas experimentales¹

En la tabla 5 se muestra un resumen de las pruebas realizados.

Tabla 5

Resultados de ensayos

Ensayo	Masa (Kg)	Altura _{Lecho} estático (mm)	$U_{mf, M}$ (m/s)	Frecuencia _m (Hz)	Altura _{Lecho} Dinámico (mm)	$U_{f, M}$ (m/s)	Frecuencia _d (Hz)
1	0.50	35	3.0	35	100	3.5	40
2	1.00	65	3.5	40	150	4.0	45
3	1.50	95	4.0	55	200	4.5	50
4	2.00	135	4.5	50	250	5.2	55
5	2.50	165	5.2	55	300	5.8	60

Nota. Elaboración propia

Donde:

$u_{mf, M}$: Es la velocidad de mínima fluidización indicada por el sensor colocado en distribuidor previo a la entrada de la cámara de fluidización.

$u_{f, M}$: Es la velocidad de fluidización estabilizada, indicada por el sensor colocado en distribuidor previo a la entrada de la cámara de fluidización.

Frecuencia_m: Es la frecuencia a la cual se está regulando el variador del blower GB-1500S, en el momento de mínima fluidización.

Frecuencia_d: Es la frecuencia a la cual se está regulando el variador del blower GB-1500S, para una fluidización estabilizada.

Altura_{Lecho Dinámico} (mm): Es la altura del lecho aproximada en fluidización estable.

Del ensayo realizado mostramos imágenes representativas:

¹ Los resultados se trabajaron conjuntamente el equipo de investigación de la tesis (Cabanillas & Rodas, 2023)

Figura 30

Fluidización de 1kg de café



Nota. Elaboración propia

Figura 31

Fluidización de 1.5kg de café



Nota. Elaboración propia

De la Tabla 5, inferimos:

a. Con nuestro prototipo logramos fluidizar granos de café arábigo. Con diferente cantidad de masa depositada en el lecho.

b. Respecto a la velocidad teórica de mínima fluidización calculada con Ergun en $u_{mf} = 1.1946$ m/s, la teoría nos indicaba esta varía por las características físicas del grano de café, mas no de la cantidad de café de que ingrese en la cámara.

Al comparar la velocidad teórica con la velocidad indicado en el instrumento de nuestro prototipo inferimos que no se tiene mucha diferencia, y la diferencia existente es por parámetros no considerados en el modelo teórico, como en la variación geométrica de las cavidades y de fugas de aire de nuestro prototipo.

4.2 Presupuesto

Para reducir el monto del presupuesto de investigación, fue importante el apoyo de las instalaciones y equipos de la UDEP, en especial al cuenta con un equipo gasificador, de tesis previamente mencionadas.

Detallamos presupuesto en la Tabla 6:

Tabla 6

Presupuesto

1. Recursos o suministros					
Descripción	Cantidad	UM	Observación	Valor Unitario (S/)	Total S/
Laptop	1	Unidad	equipo computo	5000	5000
Sub-Total					5000
2.- Equipamiento					
Descripción	Cantidad	UM	Observación	Valor Unitario (S/.)	Total S/
Camara de fluidización	1	Unidad	Fabricación local	1062	1062
Distribuidor	1	Unidad	Fabricación local	300	300
Malla base de lecho fluidizado	1	Unidad	Ferretería	10	10
Soplador GB1500S	1	Unidad	Existente en UDEP	0	5000
Ciclón	1	Unidad	Existente en UDEP	0	2000
Tablero e instrumentación: Sensor de velocidad FTS34-4011-0MD.	1	Unidad	Existente en UDEP	0	10000
Sub-Total					18372
3.- Otros gastos					
Descripción	Cantidad	Unidad de medida	Observación	Valor Unitario (S/.)	Total S/
Movilidad local	10	traslados	Camioneta	10	100
Silicona, pernos, empaquetadura flexrite.	1	unidad	Para el ensamble	20	20
Sub-Total					120
Total					23492

Nota. Elaboración propia

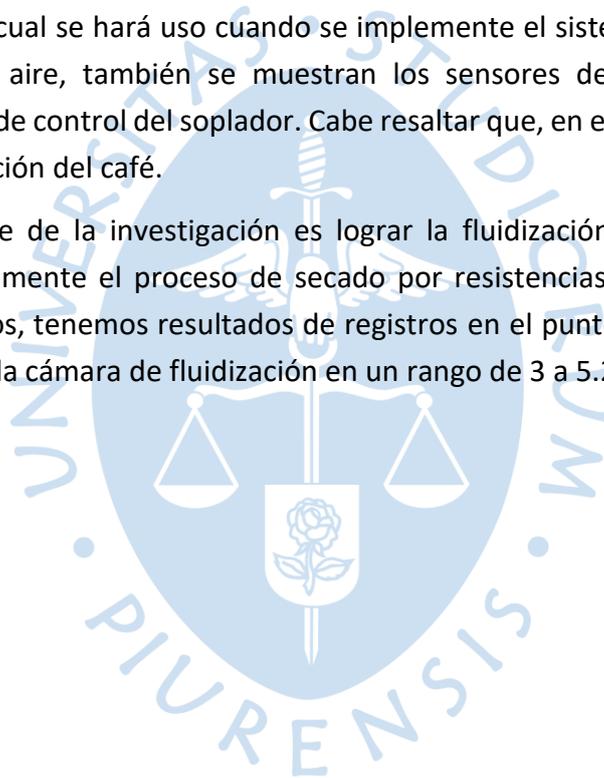


Conclusiones

Se logró hacer el diseño del sistema de control del deshidratador UDEP de lecho fluidizado.

En el trabajo de investigación se muestra la implementación del sistema de medición de temperaturas, del cual se hará uso cuando se implemente el sistema de resistencias para el calentamiento del aire, también se muestran los sensores de presión y velocidad y finalmente el sistema de control del soplador. Cabe resaltar que, en esta investigación, se hizo hincapié en la fluidización del café.

Un gran aporte de la investigación es lograr la fluidización, ya con este apartado cumplido satisfactoriamente el proceso de secado por resistencias es mucho más fácil de cumplir. En los ensayos, tenemos resultados de registros en el punto medición de velocidad del aire que ingresa a la cámara de fluidización en un rango de 3 a 5.2 m/s.





Referencias bibliográficas

- Annaratone, D. (2010). *Engineering Heat Transfer*. Berlin: Springer. doi:10.1007/978-3-642-03932-4
- Cabanillas, A., & Rodas, G. (2023). *Diseño de un prototipo de deshidratador de café arábico en lecho fluidizado*. Piura: Facultad de Ingeniería - Universidad de Piura.
- Carman, P. (1956). *Flow of gases through porous media*. New York.
- Choque, A. (2021). *Evolución de la exportación de café: 2010-2020*. Trabajo de investigación para optar el grado académico de bachiller en Ingeniería Industrial, Universidad de Lima.
- Crane Co. (2013). *Flow of Fluids Through Valves, Fittings and Pipes*. Documento técnico, Departamento de Ingeniería, Stamford.
- de Vahl Davis, G. (1964). Flow of Air Through Wire Screens. En R. Silvester, & R. Silvester (Ed.), *Hydraulics and Fluid Mechanics* (págs. 191-212). Pergamon. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-010291-7.50017-3>
- Echeverry Londoño, C. (2006). *Diseño óptimo de ciclones*. Revista Ingenierías Universidad de Medellín.
- etw cloud. (12 de 2022). Obtenido de <https://mx.etwinternational.com/1-3-1-batch-type-fluid-bed-dryer-34033.html>
- Gonzales Sánchez. (2009). *Diseño y construcción de un secador por fluidización para la deshidratación de trigo*. Tesis de grado para la obtención de título de ingeniero químico, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Gonzales Susatama. (2014). *Construcción de una planta piloto para secado de café por lecho fluidizado*. Tesis presentada para optar el grado título de magister en ingeniería agrícola, Univesidad Nacional de Colombia.
- González Susatama, L. (2014). *Construcción de una planta piloto para secado de café por lecho fluidizado*. Facultad de Ingeniería. Bogotá, D.C., Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Google maps. (s.f.). Obtenido de <https://www.google.com/maps/place/5%C2%B010'15.2%22S+80%C2%B038'17.1%22W/@-5.1708956,-80.6402579,17z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x0:0xae7ede650b639b85!8m2!3d-5.1708956!4d-80.6380692?hl=es>

Jácome Ramirez, M. (2015). *Condiciones de operación de un secador de lecho fluidizado en el procesamiento de hoja de buganvilla para la infusión rica en betalaínas*. Tesis para obtener el título de master en ciencias en proceso biológicos, Universidad de Veracruz, Orizaba, México.

Jaramillo Calle, A., & Narvéez Quiranza, E. (2012). *Diseño y construcción de un secador de grano por fluidización e implementación del control de Flujo y Temperatura*. Tesis para optar el título de ingeniero en electrónica y control .

Lopez Fontal , E. (2017). Secado de café en lecho fluidizado. *Revista Ingeniería e investigación* ISSN: 0120-5609., vol. 26, núm. 1, abril, 2006, pp. 25-29. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64326102>

Martín , I., Salcedo , R., & Font, R. (2011). *Mecánica de Fluidos*. Universidad de Alicante. Obtenido de https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/20299/9/tema4_flujo%20externo.pdf

Maupoey, P., Andrés Grau, A., Barat Baviera, J., & Albors Sorolla, A. (2020). *Introducción de alimentos por aire caliente*. Editorial Universitat Politècnica de Valencia. Obtenido de ISBN: 978-84-9705-025-8

McCabe, W., Smith, J., & Harriot, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química* (Séptima ed.). Ciudad de México: McGraw Hill.

Mendieta Bojorge, R., & Picado Rivera, A. (2002). *Diseño tecnológico de un sistema separador - secador para su utilización en la recuperación de cerveza residual posterior secado de la levadura sobrante*. Tesis para optar el título de ingeniero químico, Universidad Nacional de Ingeniería , Managua, Nicaragua.

Mohsenin, N. (1970.). *Physical Properties of Agricultural Products. ransactions of the American Society of Agritultural Engineers*, vol. 8., no. 1, p. 25-29.

Mondragón, R., Julia, J., Barba, A., & Jarque, J. (2013). El proceso de secador por atomización: Formación de gránulos y cinética de secado de gotas. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, Vol 52,4,159-168*. doi:doi:10.3989/cyv.212013

Perry, R. (2019). *Perry's Chemical Engineer's Handbook* (Novena ed.). (D. Green, & M. Southard, Edits.) Nueva York: McGraw Hill.

Real Academia Española. (21 de 11 de 2022). *Diccionario de la lengua española*. Obtenido de Real Academia Española: <https://dle.rae.es/fluidizaci%C3%B3n>

Tsung Hsing. (12 de 2022). Obtenido de https://www.tsunghsing.com.tw/es/product/continuous_fluidized_bed_dryer.html

Unigarro Bolaños, D. (2007). *Secado de café arabigo coffea arábica L. de la variedad caturra mediante lecho fluidizado*. Tesis para la obtención del título de ingeniero Agroindustrial, Universidad técnica del norte , Ibarra, Ecuador.

Urrutia Sánchez, R. (2006). *Diseño de un secador piloto de lecho fluidizado para Biomasa Forestal*. Universidad Austral de Chile.

Wen, C. Y., & Yu, Y. H. (1966). A generalized method for predicting the minimum fluidization velocity. *Aiche Journal*, 12, 610-612.

White, F., & Xue, H. (2021). *Fluid Mechanics*. Nueva York: McGraw Hill.

Xcluder. (16 de Noviembre de 2022). *Wire Meshes*. Obtenido de Xcluder: <https://www.xcluder.co.nz/products/wire-meshes/>





Anexos

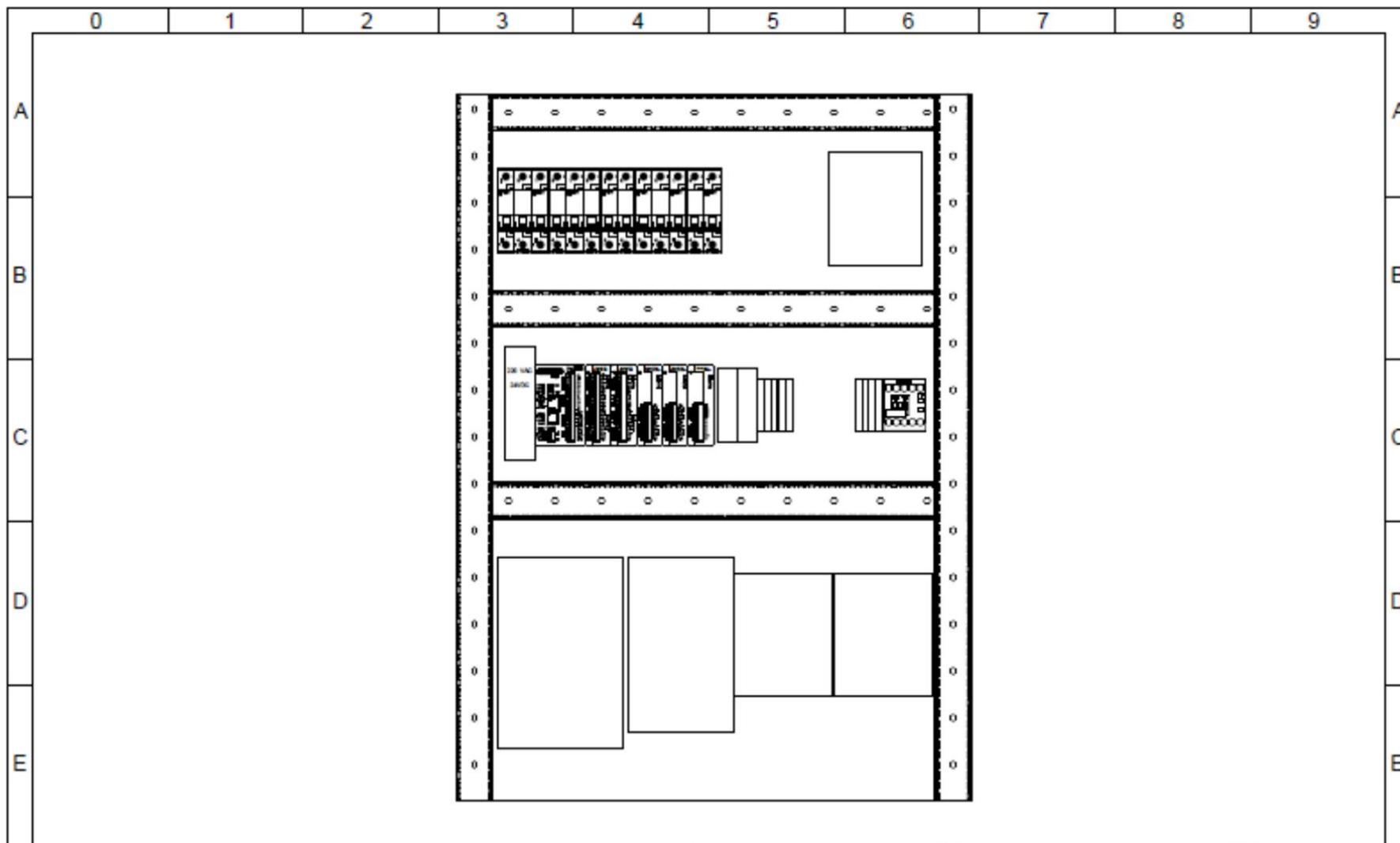




Anexo A Layout y planos eléctricos del secador

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
A	 <p>UNIVERSIDAD DE PIURA</p> <p>CLIENTE: UNIVERSIDAD DE PIURA</p> <p>NOMBRE DEL PROYECTO: TABLERO SECADOR</p> <p>PARTE DEL PROYECTO: LAYOUT Y PLANOS ELÉCTRICOS</p> <p>FECHA: 23/05/2022</p> <p>TENSIÓN DE CONTROL: 24 VDC</p> <p>TENSIÓN DE FUERZA: 220 VAC</p>										A
B											B
C											C
D											D
E											E
Revisión	Nº	DESCRIPCIÓN	FECHA	NOMBRE		CLIENTE: UNIVERSIDAD DE PIURA	PLANO: PORTADA	CODIGO: ELECT-23052022			
	1	Según construido	23-05-2022	A. Smith Ramos T.		PROYECTO SECADOR		DISEÑO: A. Smith Ramos T.			
	2	Revisión	23-05-2022	Dantty M. Ramos T.		◀ 1 ▶ 2					

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9																																																				
A											A																																																			
B											B																																																			
C											C																																																			
D											D																																																			
E											E																																																			
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>HOJA</th> <th>REV</th> <th>DESCRIPCION</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>-</td><td>PORTADA</td></tr> <tr><td>2</td><td>-</td><td>INDICE</td></tr> <tr><td>3</td><td>-</td><td>LAYOUT</td></tr> <tr><td>4</td><td>-</td><td>HOJA LIBRE</td></tr> <tr><td>5</td><td>-</td><td>CONEXIÓN FUERZA VARIADORES 1-3</td></tr> <tr><td>6</td><td>-</td><td>CONEXIÓN DE FUERZA VARIADOR 4, TRAFIO Y FUENTE</td></tr> <tr><td>7</td><td>-</td><td>MÓDULOS PLC</td></tr> <tr><td>8</td><td>-</td><td>MÓDULO DE ENTRADAS Y SALIDAS PLC</td></tr> <tr><td>9</td><td>-</td><td>MÓDULO DE ENTRADAS Y SALIDAS ANALÓGICAS PLC</td></tr> <tr><td>10</td><td>-</td><td>MÓDULO RTD 1 1/2</td></tr> <tr><td>11</td><td>-</td><td>MÓDULO RTD 1 2/2</td></tr> <tr><td>12</td><td>-</td><td>MÓDULO RTD 2 1/2</td></tr> <tr><td>13</td><td>-</td><td>MÓDULO RTD 2 2/2</td></tr> <tr><td>14</td><td>-</td><td>MÓDULO TK 1</td></tr> <tr><td>15</td><td>-</td><td>MÓDULO TK 2</td></tr> <tr><td>16</td><td>-</td><td>MÓDULO DE ENTRADAS ANALÓGICAS</td></tr> </tbody> </table>										HOJA	REV	DESCRIPCION	1	-	PORTADA	2	-	INDICE	3	-	LAYOUT	4	-	HOJA LIBRE	5	-	CONEXIÓN FUERZA VARIADORES 1-3	6	-	CONEXIÓN DE FUERZA VARIADOR 4, TRAFIO Y FUENTE	7	-	MÓDULOS PLC	8	-	MÓDULO DE ENTRADAS Y SALIDAS PLC	9	-	MÓDULO DE ENTRADAS Y SALIDAS ANALÓGICAS PLC	10	-	MÓDULO RTD 1 1/2	11	-	MÓDULO RTD 1 2/2	12	-	MÓDULO RTD 2 1/2	13	-	MÓDULO RTD 2 2/2	14	-	MÓDULO TK 1	15	-	MÓDULO TK 2	16	-	MÓDULO DE ENTRADAS ANALÓGICAS	
HOJA	REV	DESCRIPCION																																																												
1	-	PORTADA																																																												
2	-	INDICE																																																												
3	-	LAYOUT																																																												
4	-	HOJA LIBRE																																																												
5	-	CONEXIÓN FUERZA VARIADORES 1-3																																																												
6	-	CONEXIÓN DE FUERZA VARIADOR 4, TRAFIO Y FUENTE																																																												
7	-	MÓDULOS PLC																																																												
8	-	MÓDULO DE ENTRADAS Y SALIDAS PLC																																																												
9	-	MÓDULO DE ENTRADAS Y SALIDAS ANALÓGICAS PLC																																																												
10	-	MÓDULO RTD 1 1/2																																																												
11	-	MÓDULO RTD 1 2/2																																																												
12	-	MÓDULO RTD 2 1/2																																																												
13	-	MÓDULO RTD 2 2/2																																																												
14	-	MÓDULO TK 1																																																												
15	-	MÓDULO TK 2																																																												
16	-	MÓDULO DE ENTRADAS ANALÓGICAS																																																												
Revisión	Nº	DESCRIPCIÓN	FECHA	NOMBRE		CLIENTE: UNIVERSIDAD DE PIURA	PLANO: INDICE	CODIGO: ELECT-20052022																																																						
	1	Según construido	23-05-2022	A. Smith Ramos T.		PROYECTO: SECADOR		DISEÑO: A. Smith Ramos T.																																																						
	2	Revisión	23-05-2022	Dantty M. Ramos T.		1 ◀ 2 ▶ 3																																																								



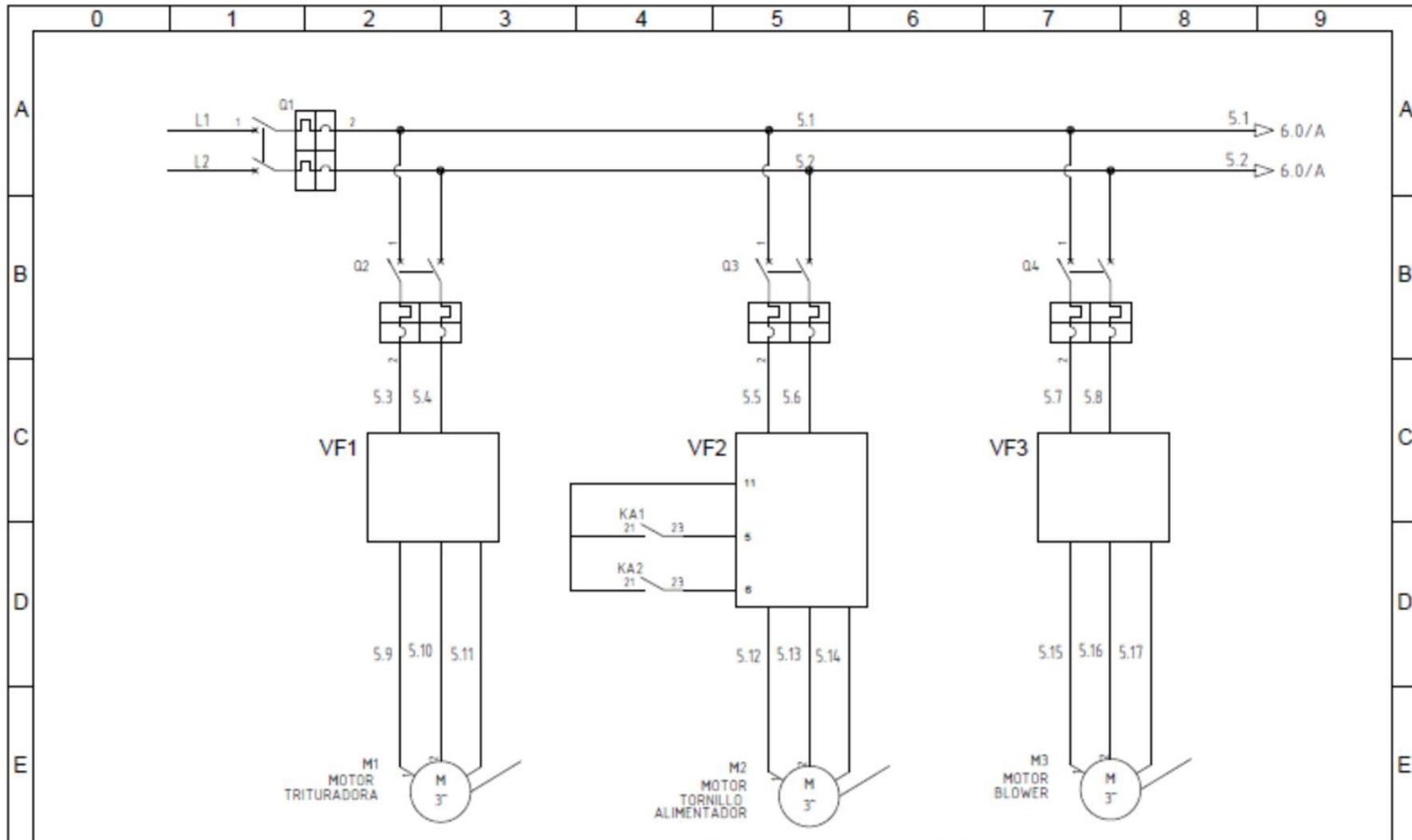
Revisión	Nº	DESCRIPCIÓN	FECHA	NOMBRE
	1	Según construido	23-05-2022	A. Smith Ramos T.
	2	Revisión	23-05-2022	Dantty M. Ramos T.



CLIENTE:
 UNIVERSIDAD DE PIURA
 PROYECTO:
 SECADOR

PLANO:
 DISTRIBUCIÓN

CODIGO:
 ELECT-23052022
 DISEÑO:
 A. Smith Ramos T.
 2 ◀ 3 ▶ 4



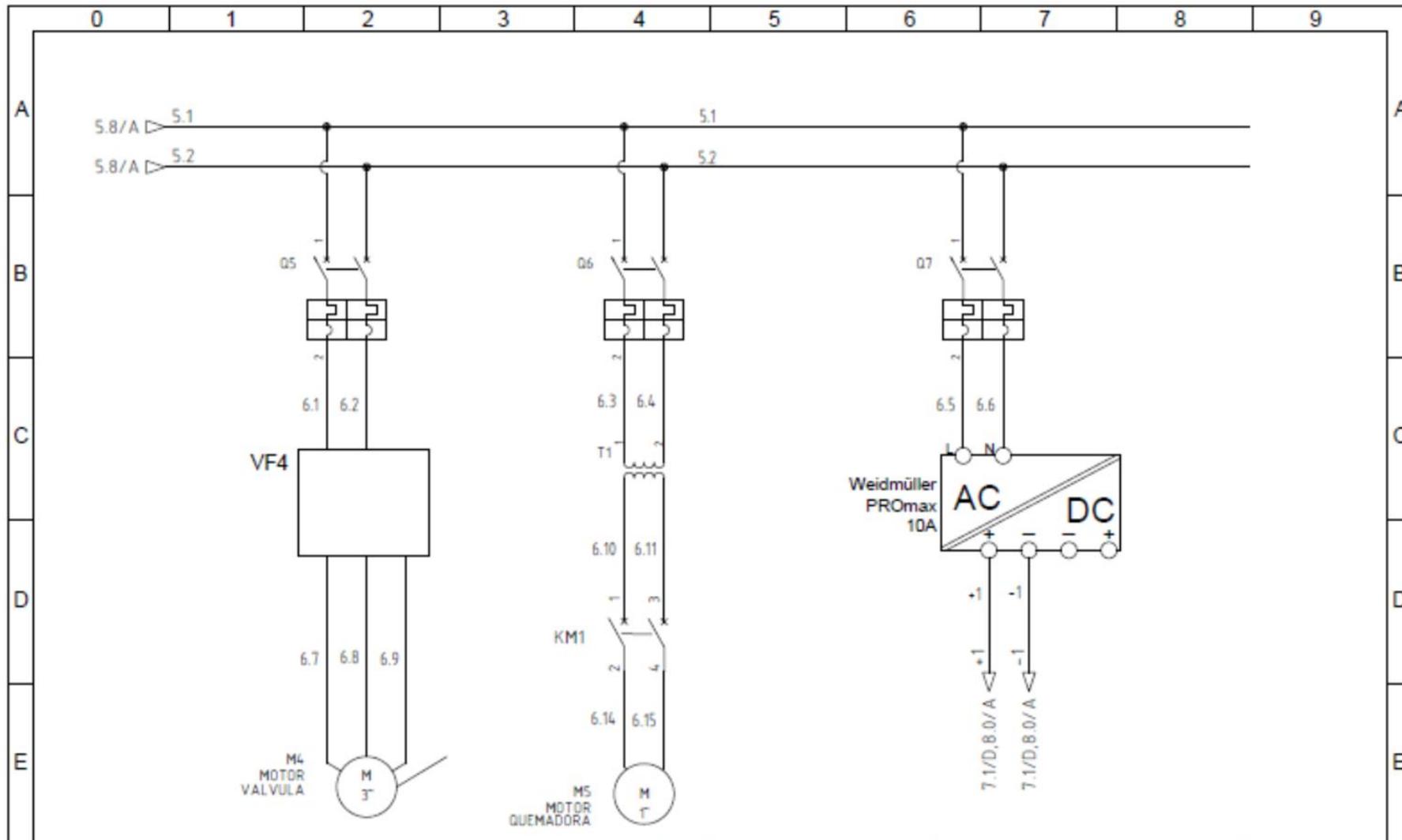
Revisión	Nº	DESCRIPCIÓN	FECHA	NOMBRE
	1	Según construido	23-05-2022	A. Smith Ramos T.
	2	Revisión	23-05-2022	Dantty M. Ramos T.



CLIENTE:
 UNIVERSIDAD DE PIURA
 PROYECTO:
 SECADOR

PLANO:
 FUERZA
 VARIADORES
 1-3

CODIGO:	ELECT-23052022
DISENO:	A. Smith Ramos T.
4 ◀ 5 ▶ 6	



Revisión	Nº	DESCRIPCIÓN	FECHA	NOMBRE
	1	Según construido	23-05-2022	A. Smith Ramos T.
2	Revisión	23-05-2022	Dantty M. Ramos T.	

CLIENTE:
UNIVERSIDAD DE PIURA

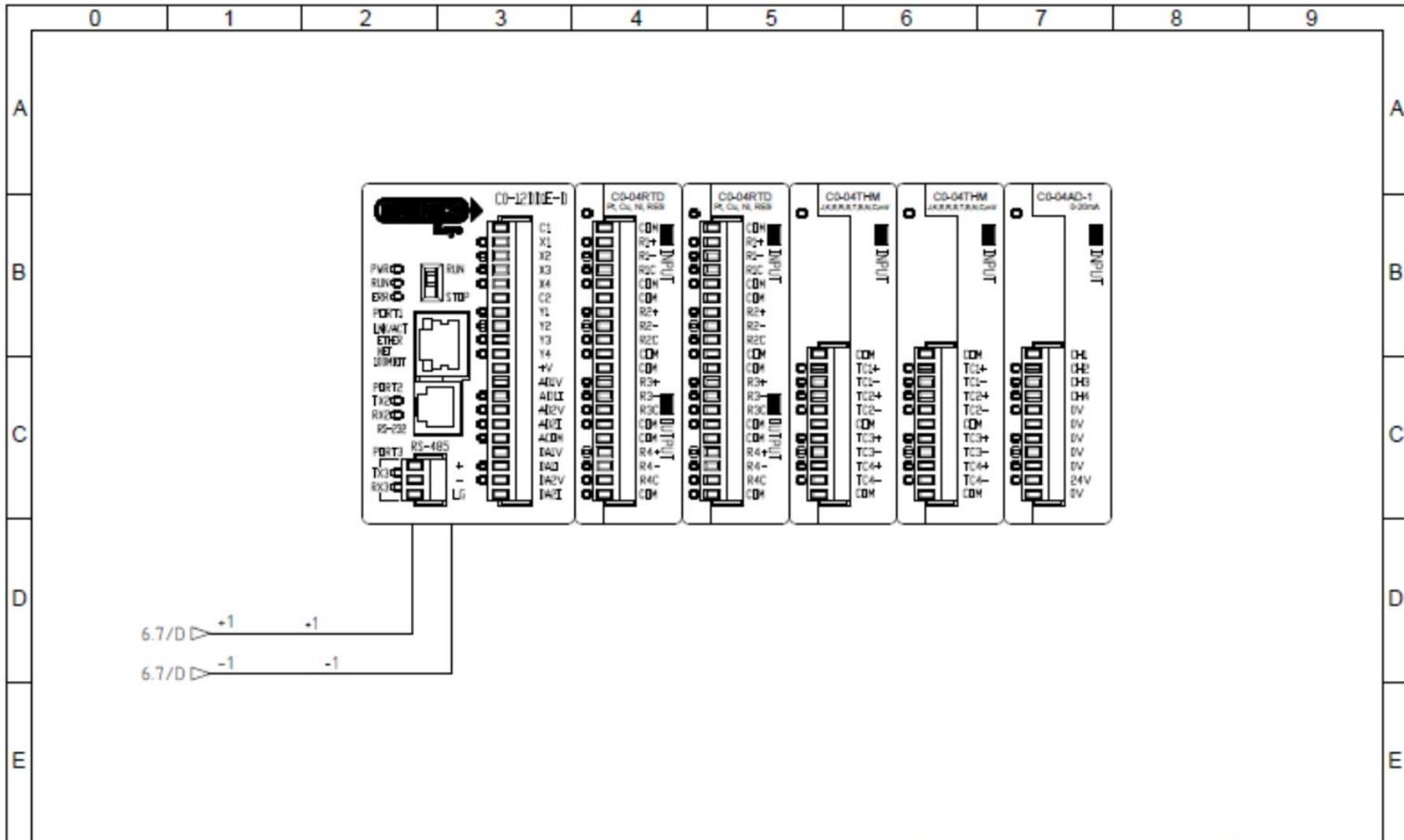
PROYECTO:
SECADOR

PLANO:
FUERZA
VARIADOR 4, TRAFO
FUENTE 24 VDC

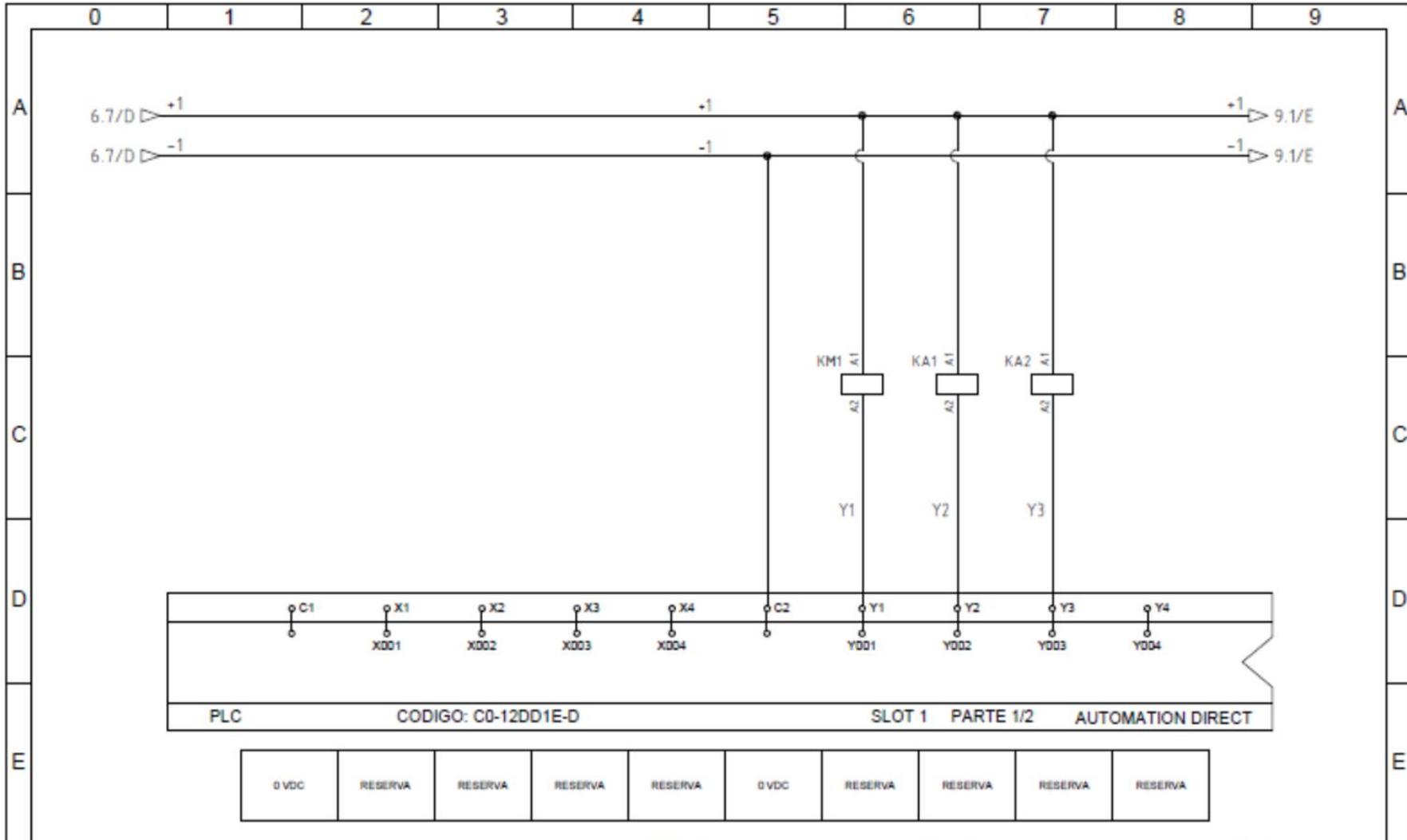
CODIGO:
ELECT-23052022

DISEÑO:
A. Smith Ramos T.

5 ◀ ◻ ▶ 7



Revisión	Nº	DESCRIPCIÓN	FECHA	NOMBRE		CLIENTE:	PLANO:	CODIGO:
	1	Según construido	23-05-2022	A. Smith Ramos T.		UNIVERSIDAD DE PIURA		PLC Y MÓDULOS
2	Revisión	23-05-2022	Danthy M. Ramos T.	SECADOR	DISEÑO: A. Smith Ramos T.			



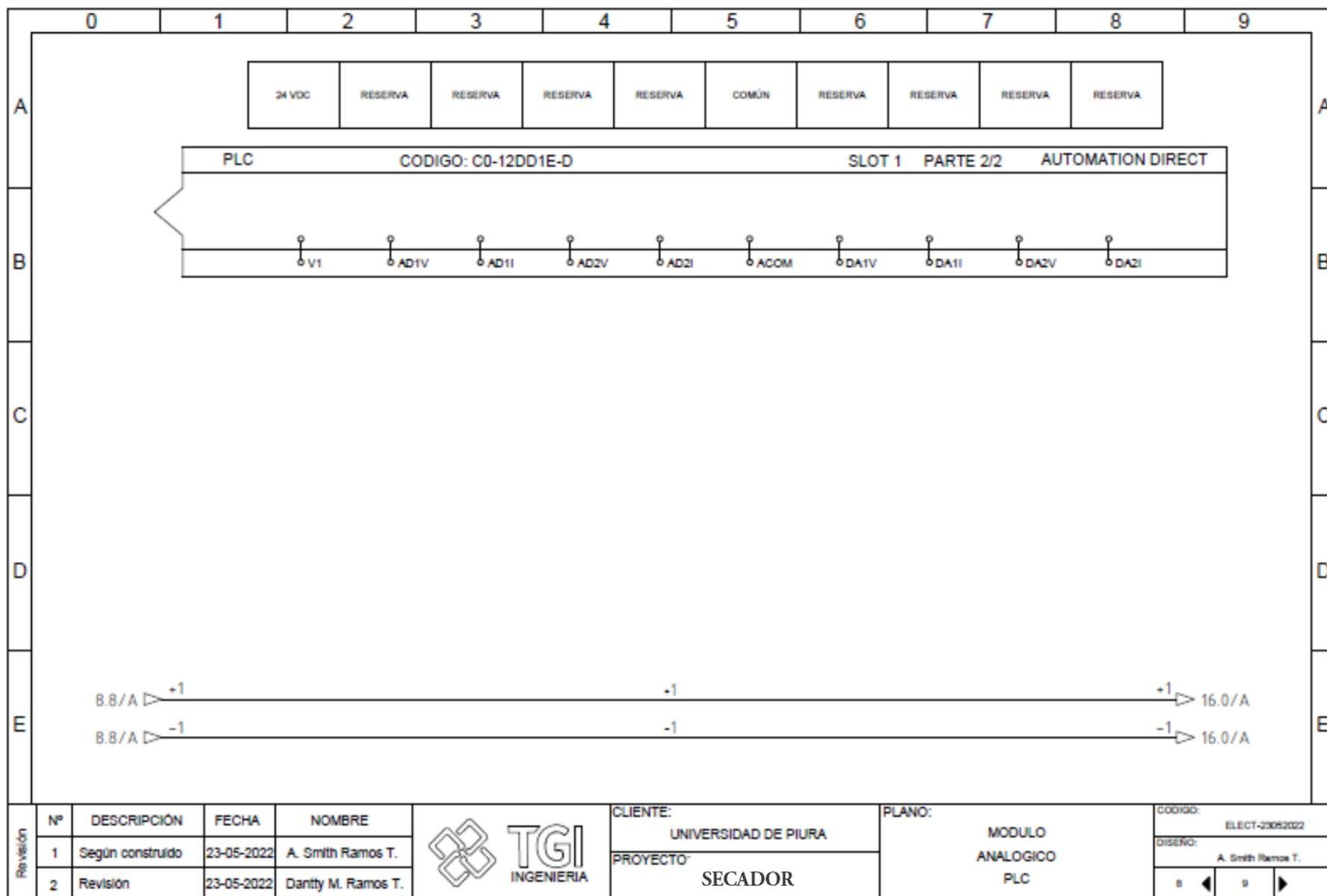
Revisión	Nº	DESCRIPCIÓN	FECHA	NOMBRE
	1	Según construido	23-05-2022	A. Smith Ramos T.
	2	Revisión	23-05-2022	Dantty M. Ramos T.

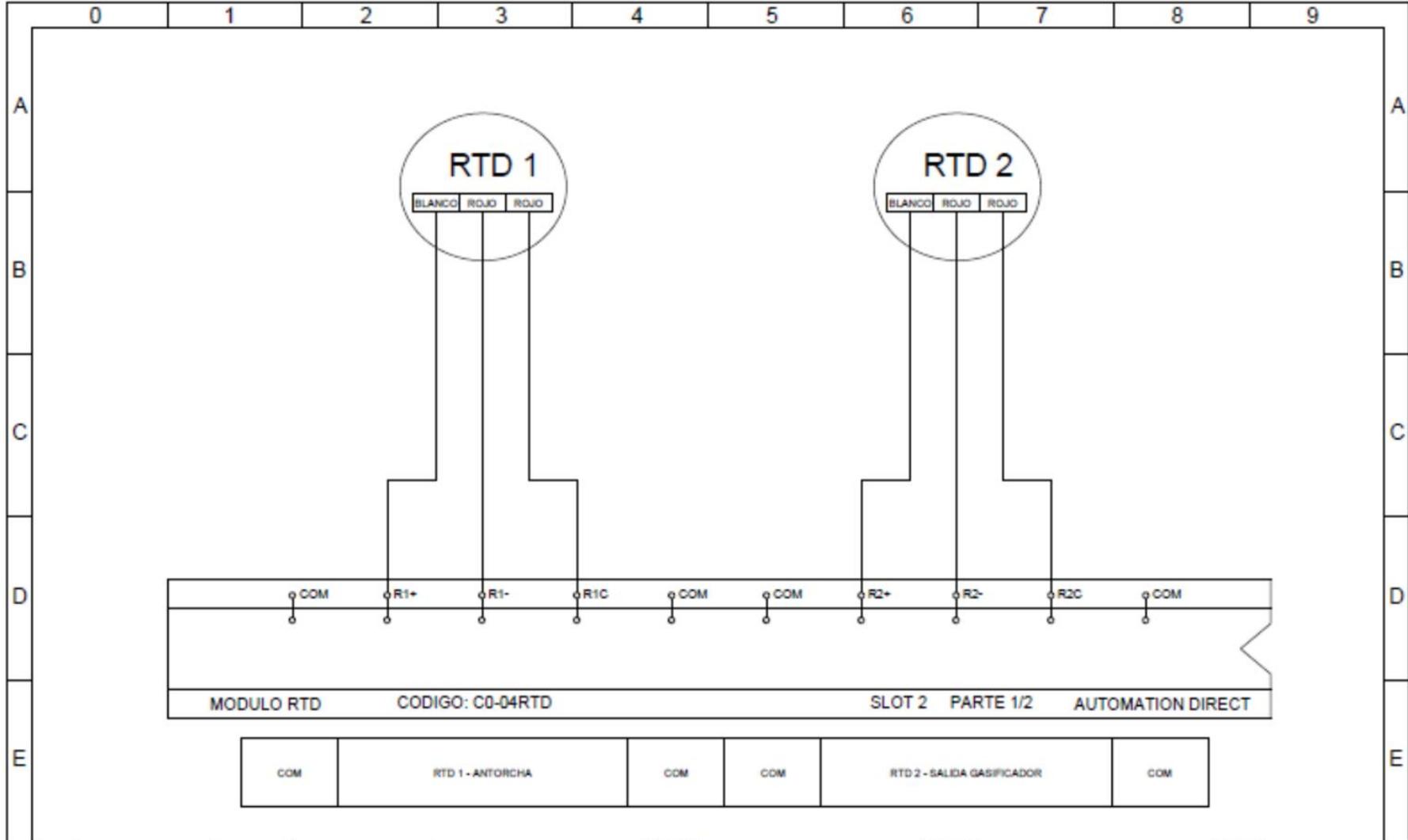


CLIENTE:
UNIVERSIDAD DE PIURA
PROYECTO:
SECADOR

PLANO:
MÓDULO
ENTRADAS Y SALIDAS
PLC

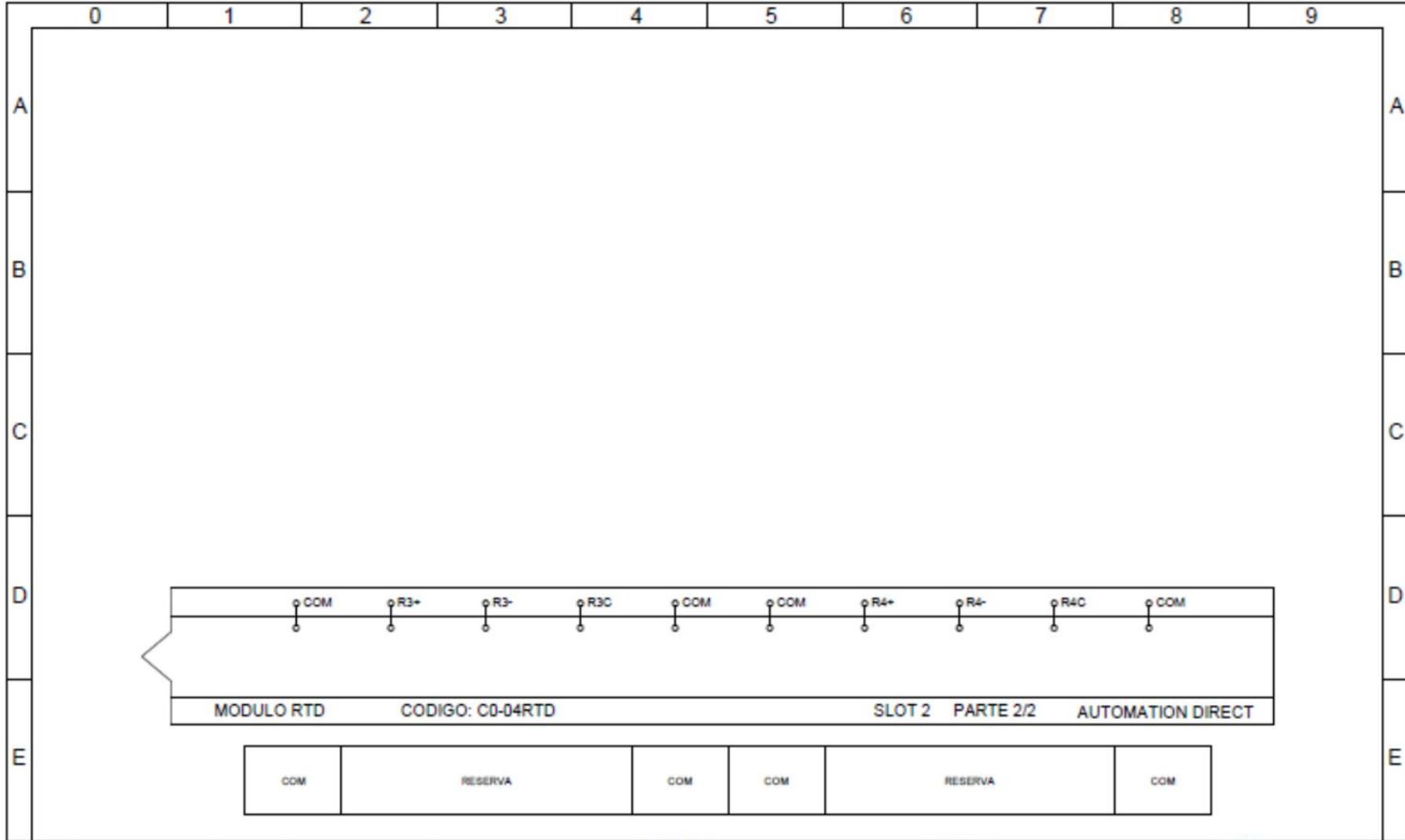
CODIGO:
ELECT-20052022
DISEÑO:
A. Smith Ramos T.
7 ◀ 8 ▶ 9



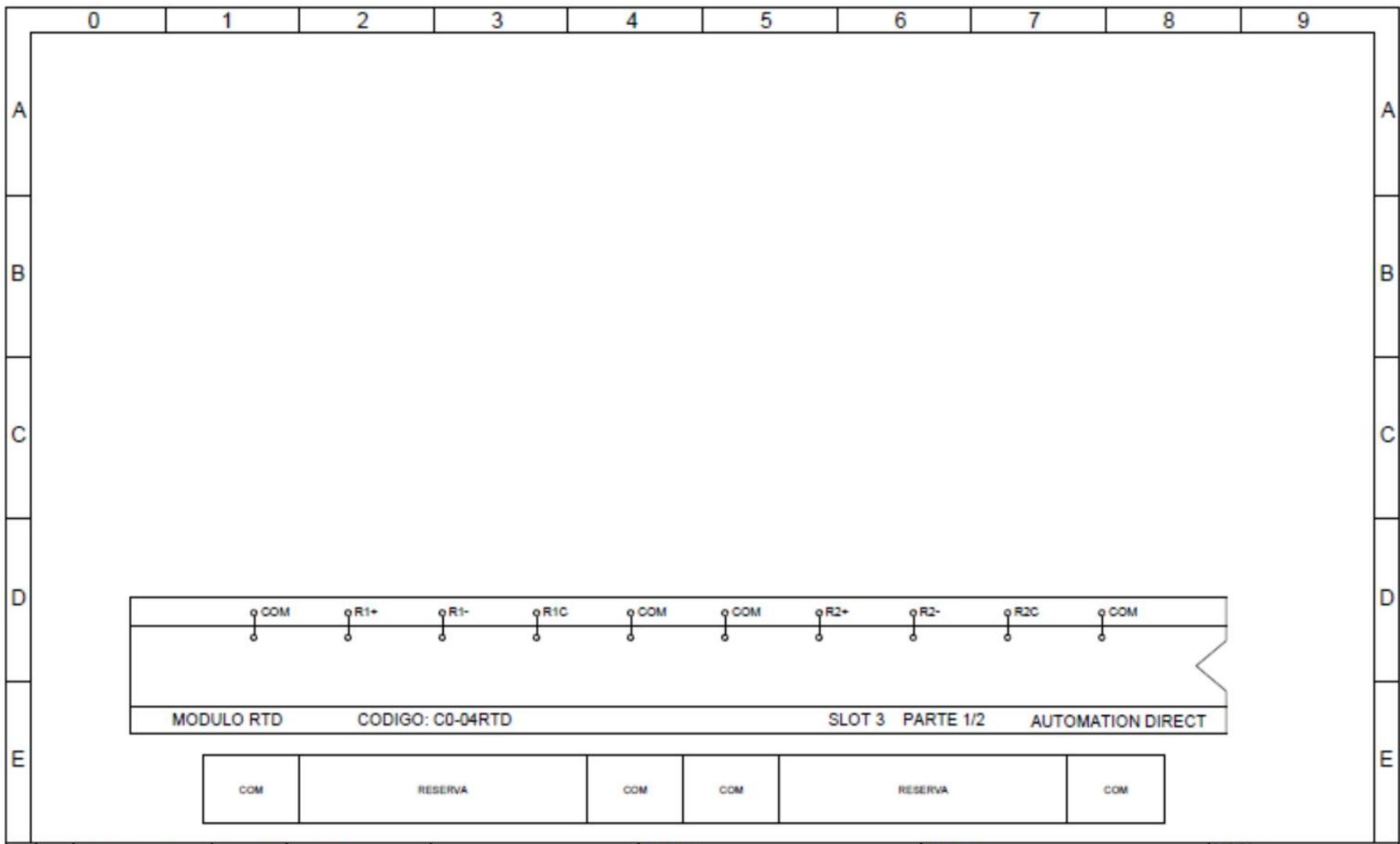


COM	R1+	R1-	R1C	COM	COM	R2+	R2-	R2C	COM
MODULO RTD		CODIGO: C0-04RTD			SLOT 2		PARTE 1/2		AUTOMATION DIRECT
COM	RTD 1 - ANTORCHA		COM	COM	RTD 2 - SALIDA GASIFICADOR		COM		

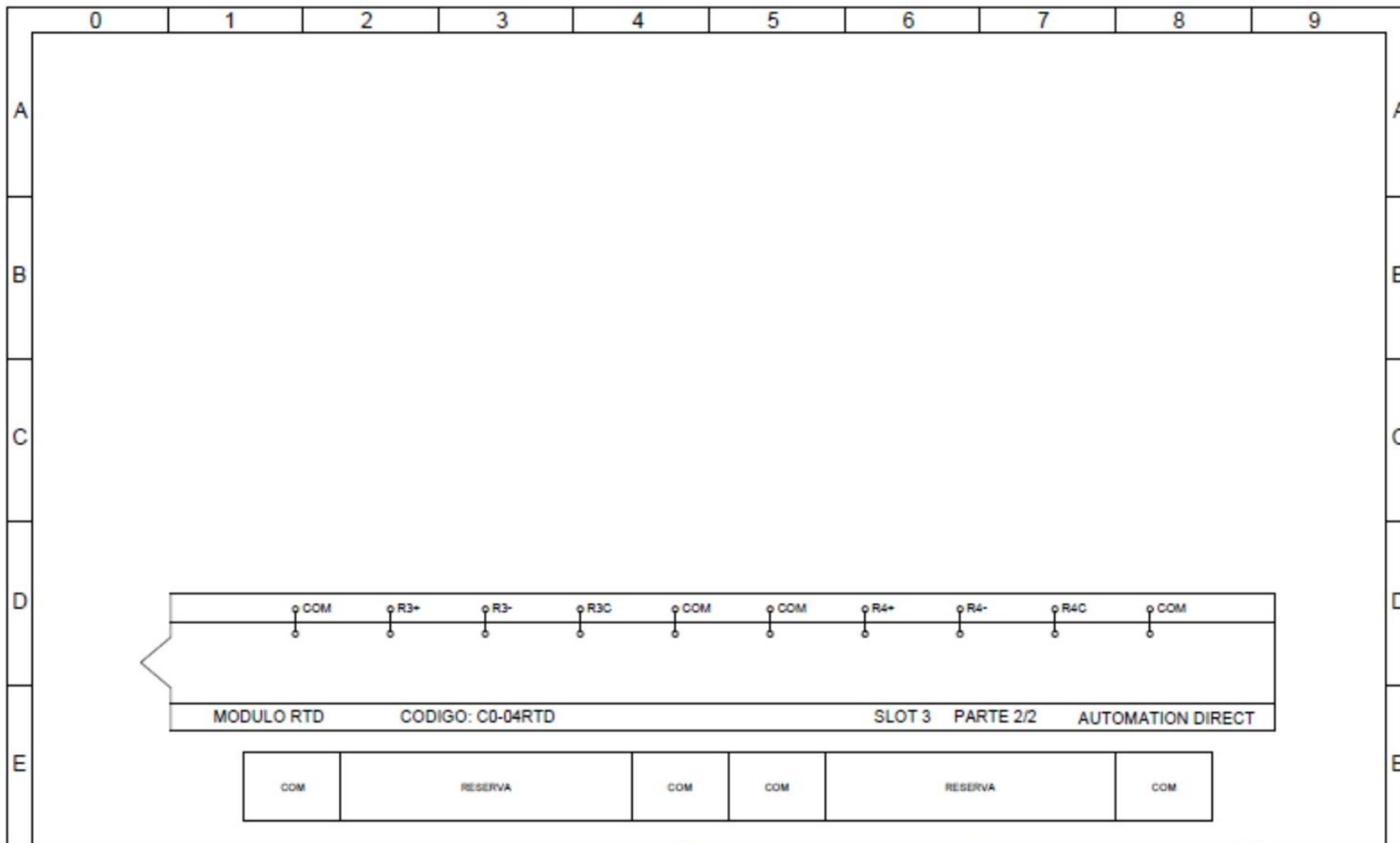
Revisión	Nº	DESCRIPCIÓN	FECHA	NOMBRE		CLIENTE:	PLANO: MODULO RTD 1 1/2	CODIGO:
	1	Según construido	23-05-2022	A. Smith Ramos T.		UNIVERSIDAD DE PIURA		ELECT-23052022
	2	Revisión	23-05-2022	Dantty M. Ramos T.		PROYECTO:		DISEÑO: A. Smith Ramos T.
					SECADOR		9 ◀ 10 ▶ 11	



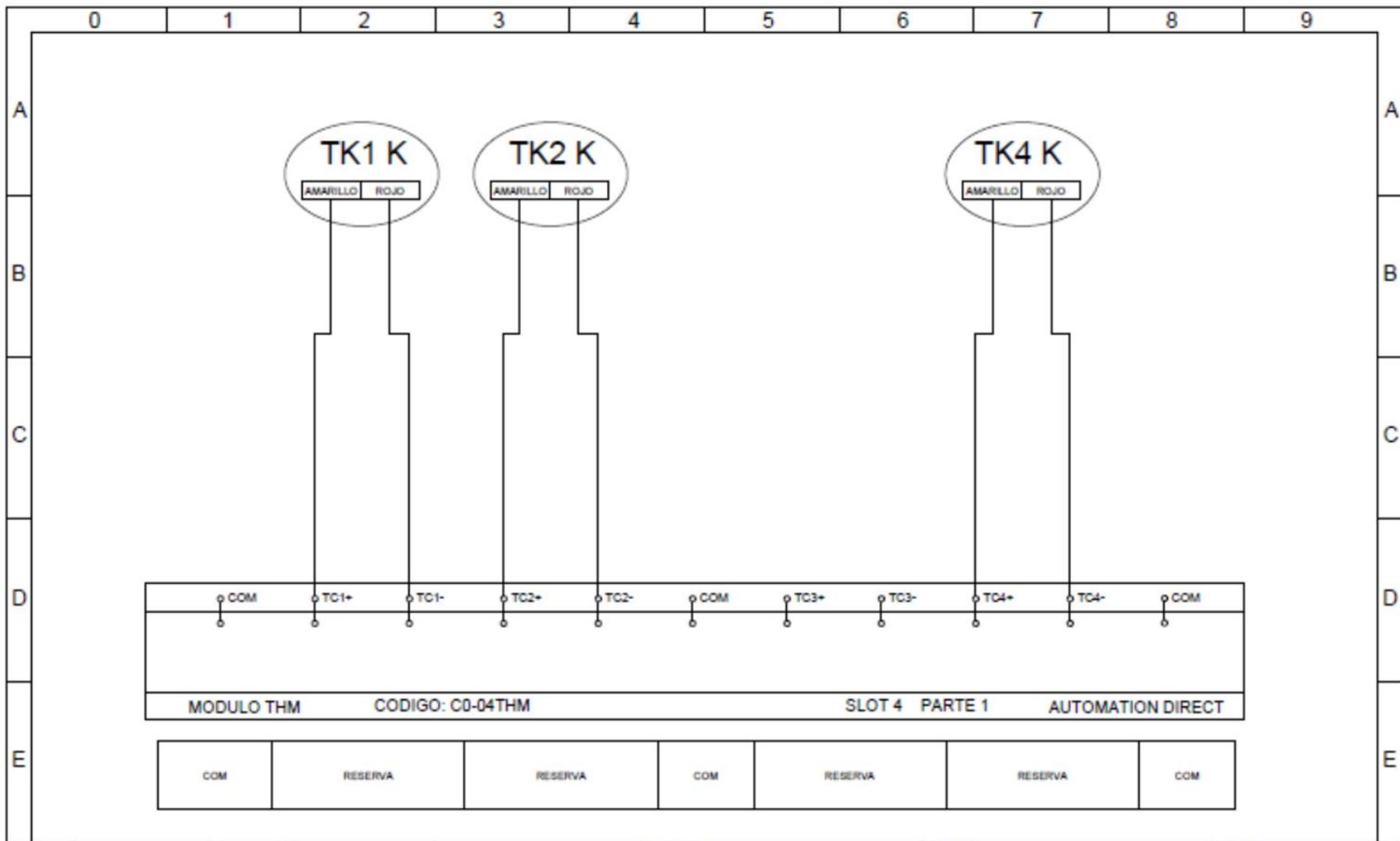
Revisión	Nº	DESCRIPCIÓN	FECHA	NOMBRE		CLIENTE:	PLANO:	CODIGO:
	1	Según construido	23-05-2022	A. Smith Ramos T.		UNIVERSIDAD DE PIURA	MODULO	ELECT-23052022
	2	Revisión	23-05-2022	Danily M. Ramos T.		PROYECTO:	RTD 1	DISENO:
					SECADOR	2/2	A. Smith Ramos T.	10 ◀ 11 ▶ 12



Revisión	Nº	DESCRIPCIÓN	FECHA	NOMBRE		CLIENTE:	PLANO:	CODIGO:
	1	Según construido	23-05-2022	A. Smith Ramos T.		UNIVERSIDAD DE PIURA	MODULO RTD 2 1/2	ELECT-23052022
	2	Revisión	23-05-2022	Dantty M. Ramos T.		PROYECTO: SECADOR		DISEÑO: A. Smith Ramos T.
								11 ◀ 12 ▶ 13



Revisión	Nº	DESCRIPCIÓN	FECHA	NOMBRE		CLIENTE:	PLANO: MODULO RTD 2 2/2	CODIGO:	ELECT-23052022
	1	Según construido	23-05-2022	A. Smith Ramos T.		UNIVERSIDAD DE PIURA		DISEÑO:	A. Smith Ramos T.
	2	Revisión	23-05-2022	Dantty M. Ramos T.		PROYECTO:		SECADOR	12 ◀ 13 ▶ 14



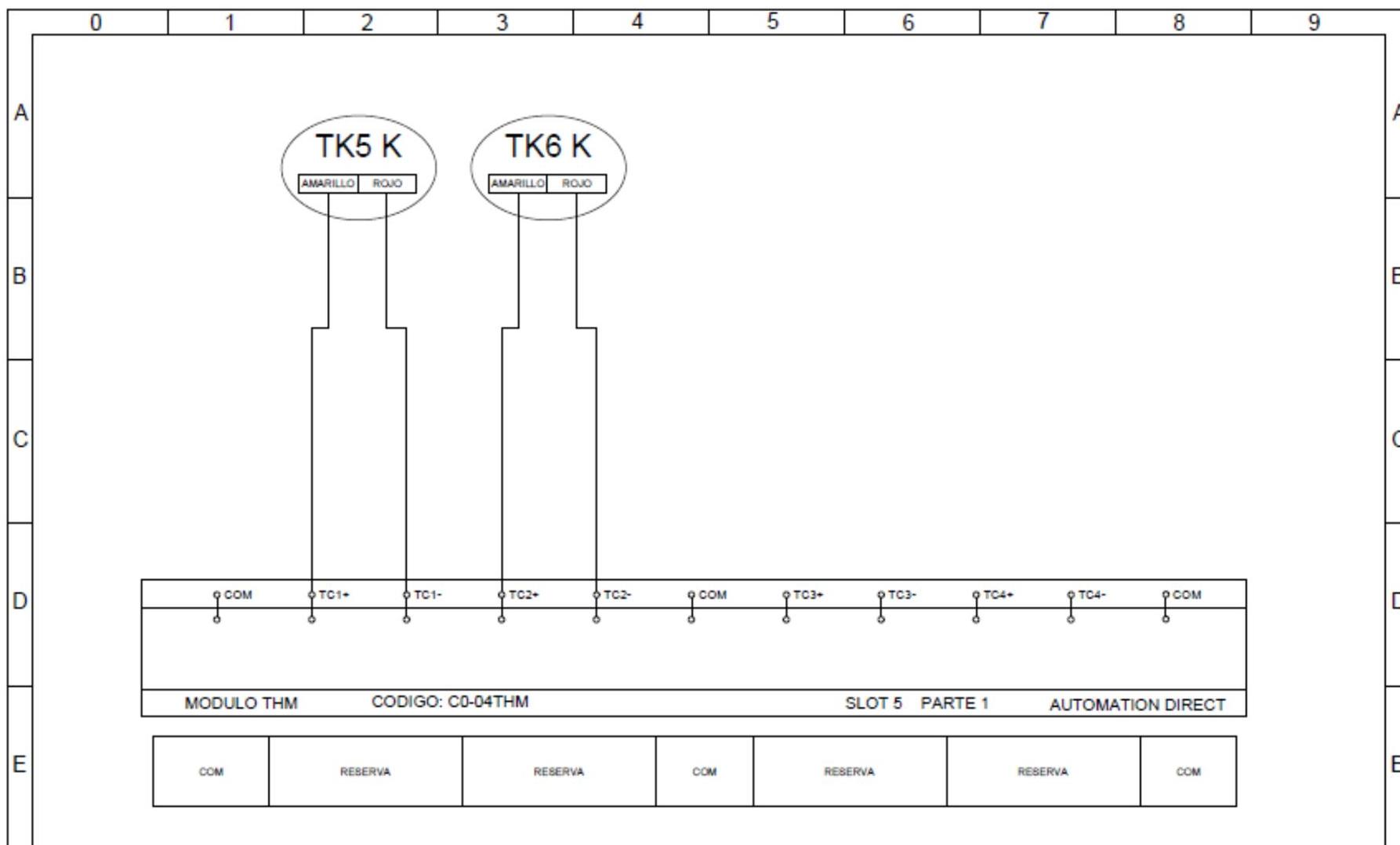
Revisión	Nº	DESCRIPCIÓN	FECHA	NOMBRE
	1	Según construido	23-05-2022	A. Smith Ramos T.
	2	Revisión	23-05-2022	Dantty M. Ramos T.



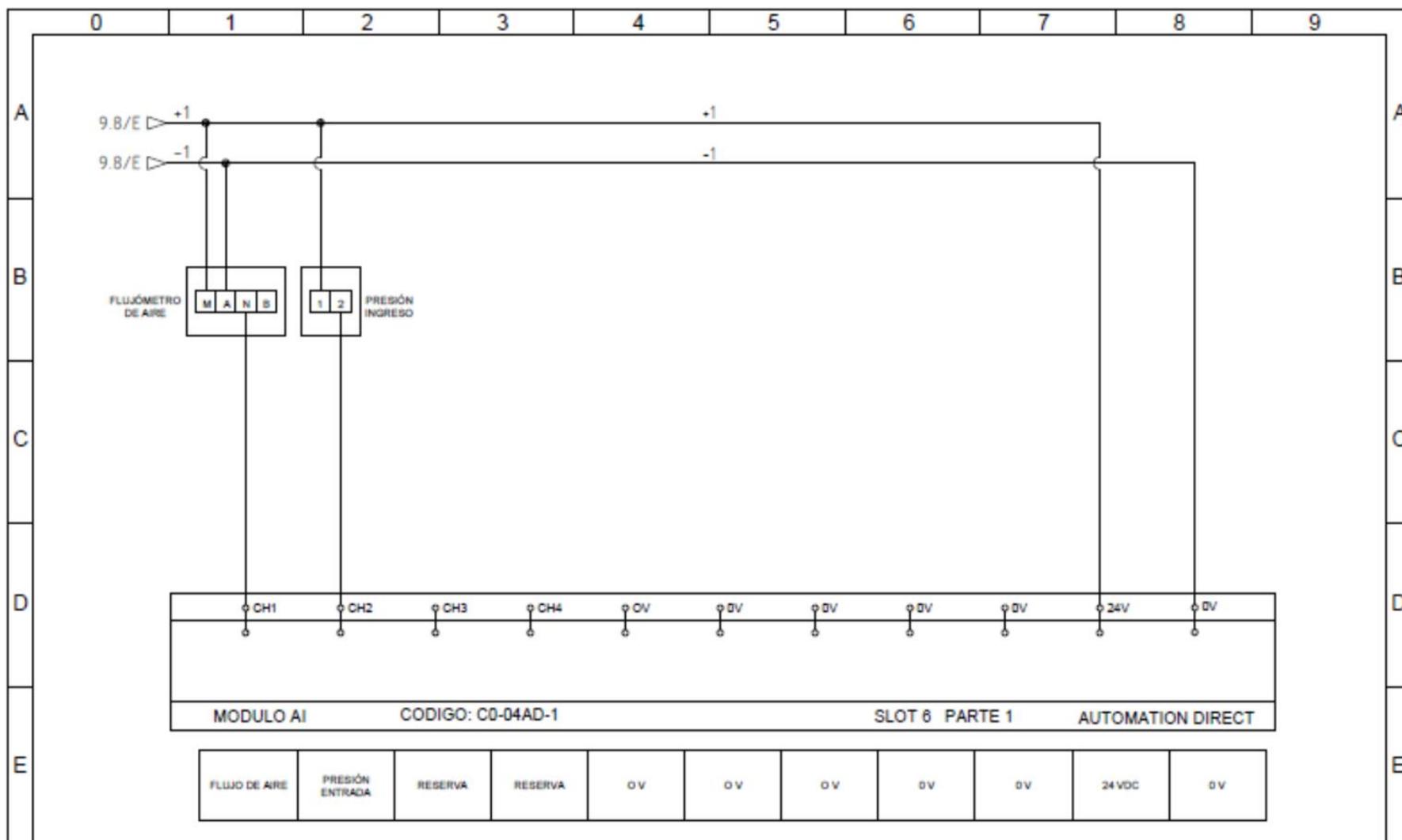
CLIENTE:
 UNIVERSIDAD DE PIURA
 PROYECTO:
 SECADOR

PLANO:
 MODULO
 TK
 1

CODIGO: ELECT-20052022
 DISEÑO: A. Smith Ramos T.
 13 ◀ 14 ▶ 15



Revisión	Nº	DESCRIPCIÓN	FECHA	NOMBRE		CLIENTE:	PLANO:	CODIGO:		
	1	Según construido	23-05-2022	A. Smith Ramos T.		UNIVERSIDAD DE PIURA		MODULO	ELECT-23052022	
	2	Revisión	23-05-2022	Dantty M. Ramos T.		PROYECTO:		TK	DISEÑO:	
					SECADOR		2	A. Smith Ramos T.		
								14 ◀	15 ▶	16



Revisión	Nº	DESCRIPCIÓN	FECHA	NOMBRE
	1	Según construido	23-05-2022	A. Smith Ramos T.
	2	Revisión	23-05-2022	Dantty M. Ramos T.



CLIENTE:
UNIVERSIDAD DE PIURA
PROYECTO
SECADOR

PLANO:
MODULO
ENTRADAS
ANALOGICAS

CODIGO:
ELECT-23052022
DISEÑO:
A. Smith Ramos T.
15 ◀ 16 ▶