



FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Industrial

“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
CALENTAMIENTO PARA EL PROCESO DE
EVAPORACIÓN DE UN INGENIO AZUCARERO”

Trabajo de suficiencia profesional para optar el título
profesional de:

INGENIERO INDUSTRIAL

Autor:

Br. Roy Antonio Yupanqui Tomas

Asesor:

Mg. Ing. Odar Roberto Florián Castillo

Trujillo - Perú

2021

Tabla de contenidos

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO.....	3
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE ECUACIONES	8
RESUMEN EJECUTIVO	11
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	12
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	27
CAPÍTULO III. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA.....	86
CAPÍTULO IV. RESULTADOS	89
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	103
REFERENCIAS.....	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores promedio de coeficientes de transferencia de calor en kW/(m ² .K) conocidos para distintos tipos de evaporadores utilizados en fábricas de azúcar.	73
Tabla 2: Valores del coeficiente de Evaporación en kg/(m ² .h)	74
Tabla 3: Coeficientes de transferencia de calor para diseño en kW/(m ² .K).....	77
Tabla 4: Variables de proceso sin contar con sistema de calentamiento para el proceso de Evaporación – Durante veintisiete días	91
Tabla 5: Variables de proceso con sistema de calentamiento para el proceso de Evaporación – Durante treinta y cuatro días.....	95
Tabla 6: Comparativo de proceso de evaporación sin y con un sistema de Calentamiento	98
Tabla 7: Presupuesto de implementar un sistema de calentamiento para el proceso de evaporación.....	99
Tabla 8: Datos generales para determinar cantidad de bagazo ahorrado anualmente.	100
Tabla 9: Cálculo de ahorro de Bagazo, considerando una recuperación de 70% del ahorro de energía.	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Descarga de caña con grúa hilo.	14
Figura 2: Tandem de 6 molinos.	15
Figura 3: Tanques de encalamiento de jugo.	16
Figura 4: Calentadores de jugo encalado.....	17
Figura 5: Clarificador de jugo SRI.	18
Figura 6: Sistemas de filtración de lodos de cachaza.	19
Figura 7: Evaporadores múltiple efecto tipo Robert.	20
Figura 8: Clarificación de jarabe por flotación.....	21
Figura 9: Área de cristalización y cocimiento – Tachos Bach.	22
Figura 10: Batería de Centrifugas Bach para masa primera.	23
Figura 11: Secador de azúcar.	24
Figura 12: Sala de envase.	24
Figura 13: Organigrama Gerencia de Producción.	25
Figura 14: Diagrama de operaciones – Cartavio S.A.A.	26
Figura 15: Intercambiadores de tubería doble.	30
Figura 16: Curvas características de evolución de temperaturas en intercambiadores.	31
Figura 17: Intercambiador de placas.	32
Figura 18: Tipos de intercambiadores de calor.	33
Figura 19: Intercambiado de cabezal flotante interno.	34
Figura 20: Intercambiador de lámina y tubo fijo.....	35
Figura 21: Intercambiador de Cabezal Flotante Exterior.	35
Figura 22: Intercambiador de cabezal y tubos integrados.	36
Figura 23: Gráfica de diferencia media logarítmica de temperaturas.	39
Figura 24: Gráfica para determinación del factor de corrección.....	41

Figura 25: Gráfica para determinación del factor de corrección.	41
Figura 26: Dimensiones convencionales según diámetro de tubos.	42
Figura 27: Tabla para determinar coeficiente de películas.....	45
Figura 28: Tabla para determinar coeficiente de películas lado tubo.....	46
Figura 29: Factor de corrección en función a la configuración y diámetro de los tubos.....	49
Figura 30: Tabla para determinar el tamaño del casco según el número de tubos para diámetro $\frac{3}{4}$ in con separación 15/16 in y configuración triangular.	51
Figura 31: Caída de presión para los fluidos dentro de los tubos.....	52
Figura 32: Tabla para determinar las constantes NFD y NC.....	55
Figura 33: Elevación del punto de Ebullición de soluciones puras.	60
Figura 34: Diagrama esquemático de un evaporador individual.	62
Figura 35: Arreglo de evaporadores múltiple efecto con flujo concurrente.	70
Figura 36: Arreglo de evaporadores múltiple efecto con flujo contracorriente.	70
Figura 37: Arreglo de evaporadores múltiple efecto con flujo combinado.	70
Figura 38: Diagrama esquemático para cálculos de evaporadores.	81
Figura 39: Esquema de la evaporación instantánea por descompresión “flash” de condensado.	84
Figura 40: Balance de energía usando el método riguroso para determinar el consumo de vapor sin contar con sistema de calentamiento para el proceso de evaporación – base 6000 TNcaña/día – ingenio Cartavio.	89
Figura 41: Datos del proceso de evaporación de quintuple efecto.....	90
Figura 42: Datos del proceso de evaporación de quintuple efecto.	90
Figura 43: Esquema del sistema de calentamiento para el proceso de evaporación.	93
Figura 44: Balance de energía usando el método riguroso para determinar el consumo de vapor con sistema de calentamiento de jugo clarificado – base 6000 TNcaña/día – Ingenio Cartavio.	94

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Diferencia media de temperaturas.	40
Ecuación 2: Diferencia media logarítmica de temperaturas.	40
Ecuación 3: Determinación de Factor P.	40
Ecuación 4: Determinación de Factor R.	40
Ecuación 5: Ecuación de transferencia de calor.	42
Ecuación 6: Ecuación de resistencias al flujo calorífico.	43
Ecuación 7: Ecuación de resistencias al flujo calorífico	43
Ecuación 8: Velocidad másica	47
Ecuación 9: Coeficiente de película	47
Ecuación 10: Coeficiente de película para Flujo turbulento $Re > 10000$	47
Ecuación 11: Coeficiente de película para Flujo turbulento $Re > 2100$	47
Ecuación 12: Número de Reynolds del fluido.	47
Ecuación 13: Superficie de intercambio de calor.	50
Ecuación 14: Número tubos de tubos por celda.	50
Ecuación 15: Perdida de presión en los tubos.	52
Ecuación 16: Factor de fricción Reynols > 1190	53
Ecuación 17: Factor de fricción Reynols < 1190	53
Ecuación 18: Factor de corrección por viscosidad.	53
Ecuación 19: Velocidad transversal másica.	54
Ecuación 20: Ecuación para determinar la distancia libre (NFD).	54
Ecuación 21: La velocidad a través de la ventana.	54
Ecuación 22: Área de superficie requerida.	54

Ecuación 23: Pérdida de presión a lo largo de la estructura.....	55
Ecuación 24: Número de tubos cruzados por los desviadores.....	56
Ecuación 25: La pérdida de presión en las ventanas	56
Ecuación 26: Elevación del punto de ebullición.	58
Ecuación 27: Presión equivalente a la cabeza del líquido.....	61
Ecuación 28: Balance de masa global Evaporadores.1	62
Ecuación 29: Balance de masa global Evaporadores.2	62
Ecuación 30: Balance de masa global Evaporadores.3	62
Ecuación 31: Balance de sólidos disueltos.....	62
Ecuación 32: Balance de entalpía.....	62
Ecuación 33: Balance de entalpía con Calor perdido.	62
Ecuación 34: Balance de entalpía (cuando no hay subenfriamiento).	62
Ecuación 35: Balance de entalpía simplificada (cuando no hay subenfriamiento)	63
Ecuación 36: Coeficiente de transferencia de calor.	63
Ecuación 37: Temperatura del líquido en ebullición.	64
Ecuación 38: Temperatura del líquido en ebullición	64
Ecuación 39: Coeficiente de evaporación	76
Ecuación 40: Coeficiente de evaporación simplificando.	76
Ecuación 41: Coeficiente de evaporación simplificando.	76
Ecuación 42: Determinación de valor de k	77
Ecuación 43: Determinación de valor de k según Guo et al	77
Ecuación 44: Balance global de sólidos sobre un tren evaporador de N efectos.	80
Ecuación 45: Cantidad total de agua evaporada.....	80
Ecuación 46: Balance global de masa	82
Ecuación 47: Balance global de sólidos.	82
Ecuación 48: Balances individuales de cuerpos evaporadores.....	82

Ecuación 49: Balances individuales de cuerpos evaporadores simplificando.....	82
Ecuación 50: Balances individuales de cuerpos evaporadores	82
Ecuación 51: Balance de sólidos.	82
Ecuación 52: Balance de entalpía.....	82
Ecuación 53: Balance de entalpía usando método simplificado.	82
Ecuación 54: Calor transferido	83
Ecuación 55: Cálculo del flujo de vapor	83
Ecuación 56: Cálculo del vapor generado por ebullición en cada cuerpo	83
Ecuación 57: Cálculo de evaporación Flash – Balance de masa.	84
Ecuación 58: Cálculo de evaporación Flash – Balance de entalpía.	84
Ecuación 59: Cálculo de evaporación Flash – con entalpía y masa.	84

RESUMEN EJECUTIVO

Dentro del proceso de elaboración de azúcar, el proceso de evaporación es el que marca la eficiencia energética en la fábrica y es en donde también al material en proceso se le reduce el volumen significativamente, la empresa Cartavio venía afrontando por mucho tiempo picos en el consumo de vapor y una baja tasa de evaporación, por lo cual se planteó la instalación de un sistema de calentamiento para mejorar este proceso. Este sistema de calentamiento que permite llevar la temperatura de jugo claro desde 95°C hasta 112°C y posteriormente la inyección al tren de evaporación trajo consigo una reducción de 12.87% y 3.33% en el aumento de color y caída de pH del jugo respecto al jarabe crudo, redujo un 2.22% el consumo de Vapor/Caña y mejoró la tasa de evaporación global en 0.63%. Este proyecto tuvo una inversión de \$ 319 000 depreciada para 10 años, calculado con una tasa de descuento de 11.9%, tomando en como base solo la recuperación del 70% del ahorro de vapor, esto representaría \$ 213 896 por la venta de bagazo y arrojando un VAN y un TIR de \$ 653 229.31 y 53% respectivamente, el retorno de la inversión se dará a los 26.87 meses.

NOTA DE ACCESO

No se puede acceder al texto completo pues contiene datos confidenciales

REFERENCIAS

Alvarez Tucto, T. T. (2019). Desarrollo de un simulador con microsoft excel para el diseño y evaluación de calentadores de jugo en la industria azucarera.

CHEMICAL PROCESS EQUIPMENT, SELECTION AND DESIGN Stanley M. Walas.

Section 8 “Heat Transfer and Heat Exchangers”. Butterworth-Heinemann

E. Hugot. (1986). Handbook of Cane Sugar Engineering.

Ing. Saéñz Daniel – Jefe de División de Producción - CASA GRANDE S.A.A. (2017: 20 junio)

MANUAL DEL INGENIERO QUÍMICO. Perry & Chilton. Sección 10. “Transferencia de Calor”. Sección 11. “Equipos de Transferencia de Calor”. Mc Graw Hill

Pérez, C. (2014). Análisis de incidencia de incrustaciones que afectan la transferencia de calor en los intercambiadores de tubo y carcaza de manera horizontal, durante el proceso de elaboración de azúcar en el “Ingenio San Carlos”. Tesis de grado, Universidad de Guayaquil, Guayaquil.

PROCESS COMPONENT DESIGN. P. Buthod & all, Capítulo 8 “Heat Exchangers Design”. Universidad de Tulsa .Oklahoma.

Rein, P. 2012. Ingeniería de la Caña de Azúcar. Berlín, Alemania: Elbe Druckerei
Wittenberg.

Salazar de León, J. (2016). Diseño de un intercambiador de calor de carcaza y tubos para
ingenio Tutulá, que proporcione un beneficio económico a través del ahorro de vapor
de escape. Tesis de Grado, Univesidad de San Carlos Guatemala, Guatemala