

**UNIVERSIDAD NACIONAL
JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN**



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**

TESIS

**ANÁLISIS DEL CONSUMO DE VAPOR A DIFERENTES CONFIGURACIONES
DE FUNCIONAMIENTO DE LOS EVAPORADORES DE CUÁDRUPLE EFECTO
EN LA INDUSTRIA AZUCARERA**

PRESENTADO POR:

PEREZ PEREZ, Nilvia

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL EN INGENIERÍA QUÍMICA

ASESOR:

M(o). Jhon Herbert Obispo Gavino

Registro CIP 68007

HUACHO - 2019

**ANÁLISIS DEL CONSUMO DE VAPOR A DIFERENTES CONFIGURACIONES
DE FUNCIONAMIENTO DE LOS EVAPORADORES DE CUÁDRUPLE EFECTO
EN LA INDUSTRIA AZUCARERA**

PRESENTADO POR:

PEREZ PEREZ, Nilvia

TESIS

Dr. BERARDO BEDER RUIZ SANCHEZ

Registro CIP 26627

Presidente

Dr. MAXIMO TOMAS SALCEDO MEZA

Registro CIP 15140

Secretario

M(o). ALGEMIRO JULIO MUÑOZ VILELA

Registro CIP 116199

Vocal

M(o). JHON HERBERT OBISPO GAVINO

Registro CIP 68007

Asesor

DEDICATORIA

A Dios por estar conmigo en cada paso que doy y haberme permitido lograr mis objetivos y a mi familia por ser mi motivación de seguir adelante

PEREZ PEREZ, Nilvia



AGRADECIMIENTO

Primero y antes que nada, doy gracias a Dios, por estar conmigo a cada paso que doy por fortalecer mi corazón e iluminar mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía todo este periodo de estudio.

Agradecer hoy y siempre a mi familia, mi mamá Olga Pérez Cubas y mi papá Héctor Vidal Pérez Cabrera y hermanos Dany, Héctor y Yudit por estar presente en el proceso del logro de mis objetivos y que van a ser siempre mi fortaleza para seguir adelante.

Un agradecimiento en especial a mi asesor M(o). Jhon Herbert Obispo Gavino, por la colaboración, paciencia y apoyo.

PEREZ PEREZ, Nilvia

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xi
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	xiv
CAPITULO I.....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1 Descripción de la realidad problemática.....	1
1.2 Formulación del problema.....	1
1.2.1 Problema general.....	1
1.2.2 Problemas específicos.....	2
1.3 Objetivos de la investigación.....	2
1.3.1 Objetivo general.....	2
1.3.2 Objetivos específicos.....	2
1.4 Justificación de la investigación.....	3
1.4.1 Justificación Teórica.....	3
1.4.2 Justificación Práctica.....	3
1.4.3 Justificación Legal.....	3
1.4.4 Justificación Social.....	3

1.5	Delimitaciones del estudio.....	3
1.5.1	Delimitación Espacial	3
1.5.2	Delimitación Temporal	4
1.5.3	Delimitación Teórica.....	4
1.6	Viabilidad del estudio.....	4
1.6.1	Viabilidad técnica.....	4
1.6.2	Viabilidad ambiental	4
1.6.3	Viabilidad financiera.....	4
1.6.4	Viabilidad social.....	4
CAPITULO II.....		5
MARCO TEÓRICO.....		5
2.1	Antecedentes de la investigación.....	5
2.1.1	Investigaciones internacionales.....	5
2.1.2	Investigaciones nacionales	8
2.1.3	Otras investigaciones.....	12
2.2	Bases teóricas	13
2.2.1	Calentadores de jugo	13
2.2.1.1	Perdida de calor en los calentadores de jugo.....	13
2.2.1.2	Calculo de calentadores	14
2.2.2	Cocimiento	15
2.2.2.1	Consumo de vapor en el cocimiento.....	15
2.2.2.2	Sistema de tres templeas	15

2.2.3	Evaporadores de cuádruple efecto.....	16
2.2.3.1	Límite entre la evaporación y el cocimiento	17
2.2.3.2	Cantidad de agua a evaporar.....	17
2.2.3.3	Límite superior de la temperatura.....	18
2.2.3.4	Límite inferior de la temperatura.....	18
2.2.3.5	Temperatura de la meladura.....	19
2.2.3.6	Calculo de reevaporizados.....	20
2.2.3.7	Consumo de vapor en los evaporadores	20
2.3	Definición de términos básicos.....	20
2.4	Formulación de hipótesis.....	23
2.4.1	Hipótesis general.....	23
2.4.2	Hipótesis específicas	23
CAPITULO III		25
METODOLOGÍA.....		25
3.1	Diseño metodológico.....	25
3.1.1	Tipo de investigación	25
3.1.2	Nivel de investigación.....	25
3.1.3	Diseño.....	26
3.1.4	Enfoque	26
3.2	Población y muestra	26
3.2.1	Población.....	26
3.2.2	Muestra.....	26

3.3	Operacionalización de variables e indicadores.....	26
3.4	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	29
3.4.1	Técnicas a emplear	29
3.4.2	Descripción de los instrumentos	29
3.5	Técnicas para el procesamiento de la información.....	30
CAPITULO IV.....		31
RESULTADOS.....		31
4.1	Datos de operación de la planta para el análisis de consumo de vapor	31
4.2	Presiones de vapor saturado disponibles	32
4.3	Consumo de vapor en calentadores y tachos a las presiones disponibles.	34
4.4	Configuraciones de funcionamiento de los evaporadores de cuádruple efecto.....	34
4.5	Consumo de vapor en los equipos a diferentes configuraciones	38
CAPITULO V		51
DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		51
5.1	Discusión	51
5.2	Conclusiones.....	54
5.3	Recomendaciones	54
CAPITULO VI.....		56
FUENTES DE INFORMACIÓN.....		56
6.1	Fuentes documentales.....	56
6.2	Fuentes bibliográficas.....	58
6.3	Fuentes hemerográficas	58
6.4	Fuentes electrónicas.....	58
ANEXOS		60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de tres templeas	16
Figura 2. Sistema de evaporación súbita del condensado	19
Figura 3. Consumidores de vapor para las diferentes configuraciones	35
Figura 4. Variación consumo de vapor por cambios de presión de vapor a tachos.....	48
Figura 5. Variación consumo de vapor por cambios de presión en calentadores de jugo...	49



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Temperaturas máximas en el múltiple efecto	18
Tabla 2	Operacionalización de variables	27
Tabla 3.	Caída total de presión en los evaporadores	32
Tabla 4.	Presión de vapor en los evaporadores disponibles	33
Tabla 5.	Propiedades termodinámicas del vapor saturado disponibles	33
Tabla 6.	Consumo de vapor en % respecto a la caña limpia a las presiones disponibles..	34
Tabla 7.	Detalle de presiones de las configuraciones de consumo de vapor.....	36
Tabla 8.	Consumo de vapor en la planta con vapor en tachos a 25 psig	39
Tabla 9.	Consumo de vapor en la planta con vapor en tachos a 14,75 psig	40
Tabla 10.	Consumo de vapor en la planta con vapor en tachos a 4,97 psig	41
Tabla 11.	Consumo de vapor a 25 psig ordenado en las diferentes configuraciones.....	42
Tabla 12.	Ratio agua evaporada y vapor consumido evaporador cuádruple efecto ordenado en las diferentes configuraciones.	44
Tabla 13.	Análisis del consumo de vapor en la planta con vapor en tachos a 25, 14,75 y 4,97 psig	46

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia	61
Anexo 2. Balance de materiales sistema de tres templas – tachos y centrifugas	62
Anexo 3. Balance de materia en tachos y centrifugas A, B y C.....	71
Anexo 4. Procedimiento de cálculo del consumo de vapor en los calentadores de jugo	72
Anexo 5. Procedimiento de cálculo del consumo de vapor en los tachos.....	73
Anexo 6. Distribución de la presión en evaporadores de múltiple efecto.....	74
Anexo 7. Ecuaciones de balance de materia y energía en los evaporadores	75
Anexo 8. Simulador de evaporadores utilizado.....	78
Anexo 9. Configuración 1 del análisis del consumo de vapor	79
Anexo 10. Configuración 17 del análisis del consumo de vapor	80
Anexo 11. Configuración 33 del análisis del consumo de vapor	81
Anexo 12. Configuración 5 del análisis del consumo de vapor	82
Anexo 13. Configuración 21 del análisis del consumo de vapor	83
Anexo 14. Configuración 37 del análisis del consumo de vapor	84
Anexo 15. Configuración 6 del análisis del consumo de vapor	85
Anexo 16. Configuración 22 del análisis del consumo de vapor	86
Anexo 17. Configuración 38 del análisis del consumo de vapor	87
Anexo 18. Configuración 8 del análisis del consumo de vapor	88
Anexo 19. Configuración 24 del análisis del consumo de vapor	89
Anexo 20. Configuración 40 del análisis del consumo de vapor	90
Anexo 21. Configuración 14 del análisis del consumo de vapor	91
Anexo 22. Configuración 30 del análisis del consumo de vapor	92
Anexo 23. Configuración 46 del análisis del consumo de vapor	93
Anexo 24. Configuración 48 del análisis del consumo de vapor	94

Análisis del consumo de vapor a diferentes configuraciones de funcionamiento de los evaporadores de cuádruple efecto en la industria azucarera.

Perez Perez, Nilvia¹

RESUMEN

Objetivo: Realizar el análisis del consumo de vapor a diferentes configuraciones de funcionamiento de los evaporadores de cuádruple efecto en la industria azucarera. **Métodos:** La población y muestra del estudio son los flujos de vapor en los evaporadores de cuádruple efecto, calentadores y tachos en la industria azucarera, diseño no experimental transversal descriptivo explicativo, uso de herramientas de balance de materia y energía con programas de simulación en Microsoft Excel. **Resultados:** Se consideró tres calentadores conectados en serie que incrementan la temperatura del jugo desde 28, 45, 70 y 105 °C, un sistema de cocimiento de tres templeas A, B y C, presión de vapor de calefacción de 25 psig y un vacío de 25 pulg. de Hg para el cuarto evaporador y tachos con datos obtenidos de un balance de materiales. Las presiones de vapor saturado disponibles en el evaporador de cuádruple son: vapor calefacción (25 psig.), vapor vegetal del primer, segundo tercer y cuarto evaporador (14,75 psig, 4,97psig, 7,22 pulg Hg y 25 pulg Hg respectivamente). Para las presiones disponibles (25 psig, 14,75 psig, 4,97psig, 7,22 pulg Hg y 25 pulg Hg) el consumo de vapor en % de la caña limpia en el calentador I (3,00, 2,96, 2,92, 2,86, 2,75), en el calentador II (4,41, 4,35, 4,29, 4,20, 4,05), en el calentador III (6,17, 6,10, 6,00, 5,89, 5,86) y en tachos (13,94, 13,76, 13,55, 13,29, 12,79) respectivamente. Se selecciona 48 configuraciones viables técnicamente de funcionamiento de los evaporadores de cuádruple efecto con los calentadores I, II y II y tachos. El % de consumo de vapor respecto a la caña limpia varían desde un óptimo de 29,79 % a 45,32% para las diferentes configuraciones de funcionamiento de los evaporadores de cuádruple efecto con los calentadores I, II y II y tachos. **Conclusiones:** Se delimitó la cantidad de calentadores y el sistema de cocimiento en los tachos con las condiciones operativas. Se determinan las presiones de vapor saturado disponibles en el evaporador de cuádruple con sus respectivas propiedades termodinámicas. El consumo de vapor en % de la caña limpia en el calentador I, calentador II, en el calentador III y en los tachos disminuyen a medida que se disminuye la presión del vapor de calefacción. Para la identificación de las configuraciones de funcionamiento de los evaporadores de cuádruple efecto con los calentadores I, II y II y tachos se tuvo en cuenta que la temperatura del vapor de calefacción sea superior a la del material a calentar y/o concentrar. El consumo de vapor respecto a la caña limpia es menor en las configuraciones donde utilizan en su mayor parte vapor vegetal del tercer evaporador, seguidamente del segundo y del primer evaporador del cuádruple efecto.

Palabras clave: Análisis consumo de vapor, evaporadores cuádruple efecto, industria Azucarera

¹ Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica, email: nilviaperez61@hotmail.com

Analysis of steam consumption at different operating configurations of the four-way evaporators in the sugar industry.

Perez Perez, Nilvia¹

ABSTRACT

Objective: To carry out the analysis of the steam consumption at different operating configurations of the four-way evaporators in the sugar industry. **Methods:** The population and sample of the study are the steam flows in the quadruple effect evaporators, heaters and tachos in the sugar industry, non-experimental transverse descriptive design, use of material and energy balance tools with simulation programs in Microsoft Excel. **Results:** It was considered three heaters connected in series that increase the temperature of the juice from 28, 45, 70 and 105 ° C, a cooking system of three temples A, B and C, heating steam pressure of 25 psig and a vacuum of 25 in. of Hg for the fourth evaporator and bins with data obtained from a material balance. The saturated vapor pressures available in the quadruple evaporator are: steam heating (25 psig.), Vegetable vapor from the first, second third and fourth evaporator (14.75 psig, 4.97psig, 7.22 in. Hg and 25 in. Hg) respectively). For the available pressures (25 psig, 14.75 psig, 4.97psig, 7.22 in. Hg, and 25 in. Hg) the steam consumption in% of the clean cane in heater I (3.00, 2.96, 2.92, 2.86, 2.75), in heater II (4.41, 4.35, 4.29, 4.20, 4.05), in heater III (6.17, 6, 10, 6.00, 5.89, 5.86) and in bins (13.94, 13.76, 13.55, 13.29, 12.79) respectively. It selects 48 technically viable configurations of operation of the four-way evaporators with heaters I, II and II and bins. The% of steam consumption in relation to the clean cane vary from an optimum of 29.79% to 45.32% for the different operating configurations of the four-way evaporators with heaters I, II and II and tanks. **Conclusions:** The number of heaters and the cooking system in the bins were delimited with the operating conditions. Determine the saturated vapor pressures available in the quadruple evaporator with their respective thermodynamic properties. The steam consumption in% of the clean cane in heater I, heater II, in heater III and in the buckets decreases as the heating steam pressure decreases. For the identification of the operating configurations of the four-way evaporators with heaters I, II and II and pans, it was taken into account that the temperature of the heating steam is higher than that of the material to be heated and / or concentrated. The consumption of steam with respect to the clean cane is lower in the configurations where they use for the most part vegetable vapor from the third evaporator, followed by the second and the first four-effect evaporator.

Keywords: Analysis steam consumption, quadruple effect evaporators, Sugar industry

¹ Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica, email: nilviaperez61@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

El estudio denominado análisis del consumo de vapor a diferentes configuraciones de funcionamiento de los evaporadores de cuádruple efecto en la industria azucarera. Se realizó con el objeto de mostrar los consumos de vapor a diferentes configuraciones de vapor entre los evaporadores de cuádruple efecto con los principales equipos de calefacción como calentadores de jugo y tachos.

En tal sentido el estudio tuvo como objetivo realizar el análisis del consumo de vapor a diferentes configuraciones de funcionamiento de los evaporadores de cuádruple efecto en la industria azucarera. Para tal fin se plantearon cinco objetivos específicos: (a) determinar los datos de operación y configuración de equipos para el análisis de consumo de vapor en la industria azucarera. (b) determinar las presiones de vapor saturado disponibles y sus propiedades termodinámicas en el evaporador de cuádruple efecto, (c) determinar el consumo de vapor en los calentadores y tachos de acuerdo a las presiones disponibles en el evaporador de cuádruple efecto, (d) indicar las configuraciones de funcionamiento viables técnicamente de los evaporadores de cuádruple efecto con los calentadores y tachos, (e) calcular y analizar el consumo de vapor de las configuraciones viables técnicamente de los evaporadores de cuádruple efecto con los calentadores y tachos

En el capítulo I se realiza el planteamiento donde se formulan preguntas como ¿Qué datos de operación y configuración de equipos se requieren para el análisis de consumo en la industria azucarera? ¿Cuáles son las presiones de vapor saturado que se dispone y sus propiedades termodinámicas en el evaporador de cuádruple efecto? ¿Cuánto es el consumo de vapor en los calentadores y tachos de acuerdo a las presiones disponibles en el evaporador de cuádruple efecto? ¿Qué configuraciones de funcionamiento son viables técnicamente de los evaporadores de cuádruple efecto con los calentadores y tachos? ¿Cuánto y qué análisis

del consumo de vapor de las configuraciones viables técnicamente se obtiene de los evaporadores de cuádruple efecto con los calentadores y tachos?

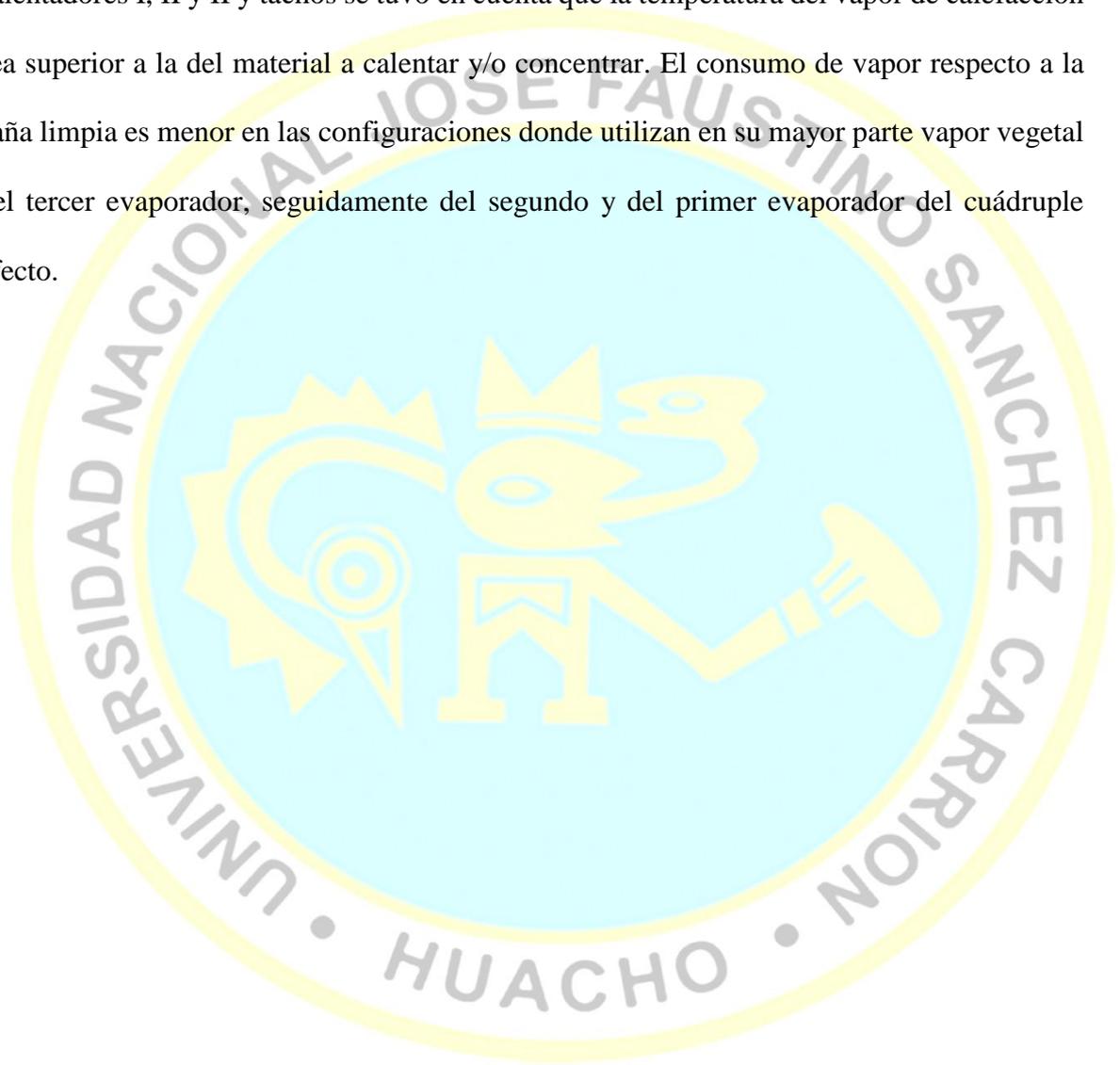
En el capítulo II se detalló el marco teórico, sus antecedentes internacionales y nacionales, bases teóricas referentes a las dos variables de estudio *variable independiente*: configuraciones de funcionamiento de los evaporadores de cuádruple efecto y *variable independiente*: análisis del consumo de vapor.

En el capítulo III de metodología, de acuerdo a la naturaleza de la Investigación es *no experimental transversal descriptivo explicativo*, utilizándose técnicas de balance de balance de materia y energía para procesar la información de las diferentes configuraciones de funcionamiento de los evaporadores de cuádruple efecto con los calentadores de jugo y tachos. Asimismo se utilizaron las herramientas de Microsoft Excel para simplificar los cálculos Adicionales a las técnicas de documentación, observación y medición.

En el capítulo IV resultados, sobre la cantidad de calentadores conectados en serie y sus temperaturas, el sistema de cocimiento en los tachos, presión de vapor de calefacción de un vacío en el cuádruple efecto. Se calculan las presiones de vapor saturado disponibles en el evaporador de cuádruple efecto. Para éstas presiones se calcula el consumo de vapor en % de la caña limpia en el calentador I, en el calentador II, en el calentador III y en los tachos. Se identifican configuraciones viables técnicamente de funcionamiento de los evaporadores de cuádruple efecto con los calentadores I, II y II y tachos. Se determina el rango del % de consumo de vapor respecto a la caña limpia para las diferentes configuraciones de funcionamiento de los evaporadores de cuádruple efecto con los calentadores I, II y II y tachos.

En el capítulo V discusión, conclusiones y recomendaciones, se discute respecto a investigaciones de los antecedentes recopilados, se concluye que se delimitó la cantidad de calentadores y el sistema de cocimiento en los tachos con las condiciones operativas. Se

determinan las presiones de vapor saturado disponibles en el evaporador de cuádruple con sus respectivas propiedades termodinámicas. El consumo de vapor en % de la caña limpia en el calentador I, calentador II, en el calentador III y en los tachos disminuyen a medida que se disminuye la presión del vapor de calefacción. Para la identificación de las configuraciones de funcionamiento de los evaporadores de cuádruple efecto con los calentadores I, II y II y tachos se tuvo en cuenta que la temperatura del vapor de calefacción sea superior a la del material a calentar y/o concentrar. El consumo de vapor respecto a la caña limpia es menor en las configuraciones donde utilizan en su mayor parte vapor vegetal del tercer evaporador, seguidamente del segundo y del primer evaporador del cuádruple efecto.



CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la realidad problemática

Al pasar de los años cada vez se incrementa el consumo de azúcar a nivel mundial. Este incremento en la demanda debe ir acompañado de un mayor control y mejora de las eficiencias en operaciones y procesos fabriles, toda vez que para su obtención se queman combustibles como el bagazo, fuente de contaminación que afecta al medio ambiente y principalmente a las áreas colindantes a la empresa.

En tal sentido, la empresas azucareras permanentemente buscan reducir sus costos, siendo los evaporadores el mayor consumidor de energía térmica, y éstos se pueden operar en un sistema de triple, cuádruple, quíntuple efecto principalmente. Dependiendo por cierto de la capacidad y/o tamaño de la planta de procesamiento.

Los sistemas de evaporación de cuádruple efecto son los más utilizados en la industria azucarera, por ello es necesario plantear alternativas del consumo de vapor a diferentes configuraciones de funcionamiento de los evaporadores de cuádruple efecto con los calentadores y tachos, con presiones de vapor de calefacción comúnmente disponibles en la planta. Es por ello se realizó el presente trabajo de investigación.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

- ¿Qué permite el análisis del consumo de vapor a diferentes configuraciones de funcionamiento de los evaporadores de cuádruple efecto en la industria azucarera?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Qué datos de operación y configuración de equipos se requieren para el análisis de consumo en la industria azucarera?
- ¿Cuáles son las presiones de vapor saturado que se dispone y sus propiedades termodinámicas en el evaporador de cuádruple efecto?
- ¿Cuánto es el consumo de vapor en los calentadores y tachos de acuerdo a las presiones disponibles en el evaporador de cuádruple efecto?
- ¿Qué configuraciones de funcionamiento son viables técnicamente de los evaporadores de cuádruple efecto con los calentadores y tachos?
- ¿Cuánto y qué análisis del consumo de vapor de las configuraciones viables técnicamente se obtiene de los evaporadores de cuádruple efecto con los calentadores y tachos?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

- Realizar el análisis del consumo de vapor a diferentes configuraciones de funcionamiento de los evaporadores de cuádruple efecto en la industria azucarera.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar los datos de operación y configuración de equipos para el análisis de consumo de vapor en la industria azucarera.
- Determinar las presiones de vapor saturado disponibles y sus propiedades termodinámicas en el evaporador de cuádruple efecto.
- Determinar el consumo de vapor en los calentadores y tachos de acuerdo a las presiones disponibles en el evaporador de cuádruple efecto.
- Indicar las configuraciones de funcionamiento viables técnicamente de los evaporadores de cuádruple efecto con los calentadores y tachos.

- Calcular y analizar el consumo de vapor de las configuraciones viables técnicamente de los evaporadores de cuádruple efecto con los calentadores y tachos.

1.4 Justificación de la investigación

1.4.1 Justificación Teórica

Se cuenta con procedimientos de balance de materia y energía para el cálculo del consumo de vapor en los calentadores, tachos y evaporadores. Adicionalmente se cuenta información especializada del sector azucarero de nuestro país.

1.4.2 Justificación Práctica

El estudio muestra las alternativas de consumo de vapor para las diferentes configuraciones que se pueda dar entre el evaporador de cuádruple efecto con los calentadores y tachos en un ingenio azucarero

1.4.3 Justificación Legal

No tiene ningún aspecto legal en contra, toda vez que aplico conocimientos de la carrera propia de mi formación. Trabajo de gabinete

1.4.4 Justificación Social

Facilitará el análisis de consumos de vapor en un ingenio azucarero a diferentes dependencias en las diferentes empresas, el cual servirá de guía para la mejora de sus procesos.

1.5 Delimitaciones del estudio

1.5.1 Delimitación Espacial

Lugar : Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión
Distrito : Huacho
Provincia : Huaura
Departamento : Lima
Región : Lima provincias

1.5.2 Delimitación Temporal

Meses : Diciembre

Año : 2018

1.5.3 Delimitación Teórica

- Análisis
- Consumo de vapor
- Evaporador de cuádruple efecto
- Industria Azucarera

1.6 Viabilidad del estudio

1.6.1 Viabilidad técnica

El estudio técnicamente es viable, toda vez que se dispone de datos de operación como presión, temperatura y métodos de operación de los equipos de los ingenios azucareros. Resaltando la disposición de información técnica especializada del sector que se está estudiando.

1.6.2 Viabilidad ambiental

Es viable ambientalmente, toda vez que no se generan impactos ambientales negativos. Entendiéndose que se usa recursos renovables como la energía eléctrica en el trabajo e informe de gabinete.

1.6.3 Viabilidad financiera

El estudio es viable financieramente dado que fue cubierto por el investigador.

1.6.4 Viabilidad social

Sociablemente es viable, dado que se tiene experiencia como investigador y asimismo el asesor posee la experiencia necesaria del sector azucarero de nuestro país.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Investigaciones internacionales

Macías & Segovia (2017), Universidad de Guayaquil, Ecuador en su trabajo de investigación: *desarrollo de un simulador para el diseño y evaluación de evaporadores de simple efecto*, cuyo objetivo fue desarrollar un software para el diseño y simulación de evaporadores de simple efecto, llegando a la conclusión de que la utilización del método de interpolación lineal en la resolución de problemas de evaporación simple causa variaciones de aproximadamente del 1% en los resultados obtenidos con el simulador. El uso del Método de Kopps para la determinación del calor específico de sustancias puras da como resultado valores similares a los mostrados en tablas experimentales. La estimación de la eliminación de la variable de la elevación del punto de ebullición en los ejercicios propuestos en los libros de estudios causa una variación del 0,10% en los resultados obtenidos en el simulador. El algoritmo desarrollado, presentó la capacidad de resolver sistema de evaporación de simple efecto con un mínimo de 1% de diferencia entre los resultados de la bibliografía y los del simulador. El uso de regresiones polinomiales para expresar datos experimentales presenta porcentajes de error mínimo del 1%, por lo cual la variación de resultados es despreciable. Luego de realizar las pruebas experimentales y de validación, se determinó que el simulador cumple con los objetivos propuestos. Se determinó que al utilizar regresiones polinomiales en el cálculo de las variables del simulador el área de diseño del

evaporador, puede presentar un porcentaje de error del 9%, debido a que los problemas de evaporación se asumen regresiones lineales.

Matías (2015), universidad de San Carlos de Guatemala en su tesis: *evaluación de la eficiencia en una refinería de azúcar al implementar un sistema de evaporación de licor, Cengicaña*, cuyo objetivo fue evaluar la eficiencia en una refinería de azúcar al implementar un sistema de evaporación de licor, llegando a concluir: El sistema de evaporación no afecta el color del licor porque no existe diferencia significativa entre los colores a la entrada y a la salida del sistema de evaporación. Los coeficientes de transferencia de calor real de los equipos del sistema de evaporación de licor cumplen con lo ofrecido por el proveedor. La cantidad de vapor vegetal ahorrado permite un considerable ahorro en bagazo y por consiguiente generar ingresos por venta de energía eléctrica.

López (2016), Universidad Nacional de Colombia en su tesis: *evaluación técnica y económica de la implementación de un sistema de evaporación de múltiple efecto en los procesos productivos de la panela*, cuyo objetivo fue determinar todas las corrientes de proceso, sus requerimientos energéticos y de servicios, llegando a concluir: que el consumo térmico de una planta con evaporación múltiple efecto es menor al consumo de otras tecnologías. En unidades de bagazo consumido, la tecnología mencionada gasta 1,15 kg de bagazo por kg. de panela producido, mientras que en otras tecnologías esta ente 1,5 y 2,09. El consumo de vapor en la etapa de evaporación múltiple efecto es de 2,07 kg. de vapor por kilogramo de panela producido.

López (2014), Universidad de Córdoba, Argentina. En su tesis: *simulador de un evaporador de simple efecto, para concentrar jugos de frutas y leche*, cuyo objetivo fue el desarrollo y validación de un simulador para un evaporador de simple efecto en las dinámicas de temperatura, concentración y nivel de líquido para leche y jugos de frutas diluidos. Llegando a concluir que se desarrolló un modelo matemático de tipo

fenomenológico a partir de los balances de materia y energía, que combinados con relaciones matemáticas empíricas de las soluciones estudiadas, resultó adecuado para describir la dinámica del sistema de evaporación de dichas sustancias en un evaporador de simple efecto. El sistema de ecuaciones diferenciales fue resuelto por el método numérico de Runge-Kutta de cuarto orden en las variables de temperatura, concentración y nivel, a través del simulador desarrollado en LabView 2011. El simulador predice el 95% de las veces el comportamiento dinámico de la temperatura, concentración y nivel de líquido dentro del evaporador. El precalentamiento de la solución permitió alcanzar. La similitud entre los datos simulados y los reales presentó mayor discrepancia en la concentración de leche que en soluciones azucaradas diluidas. El simulador reporta valores en las variables de temperatura, nivel de líquido, composición del fluido, flujos de vapor, líquido concentrado, propiedades termo físicas de las soluciones, elevación del punto de ebullición y coeficiente global de transferencia de calor. Permite hacer modificaciones a las variables de entrada y correcciones al proceso mientras está en modo de ejecución. Permite a la vez guardar los datos del proceso.

Ayala (2013), Instituto Politécnico Nacional, México D.F., en su tesis: *diseño térmico de un intercambiador de calor de coraza y tubos*, cuyo objetivo fue describir el método de cálculo de un intercambiador de calor, identificando la superficie, dimensiones y configuraciones de tubos y carcassas y conocer las aplicaciones principales y pasos para la selección de un intercambiador de calor, los materiales a utilizar y los costes, llegando a las siguientes conclusiones que existen diversos tipos de intercambiadores de calor, la elección de cualquiera de estos depende de la necesidad de que se tenga, el tipo de material con el que se deberá construir. Para la selección o construcción del intercambiador de calor se realiza cálculos correspondientes a este, como son: cálculo térmico, hidráulico y mecánico. Cada uno de ellos aportará datos importantes para construir o seleccionar un intercambiador

de calor eficiente y eficaz. Es muy importante tomar en cuenta el tipo de industria para la que será requerido el intercambiador de calor, ya que como pudimos ver anteriormente, también existen muchos tipos de intercambiadores, mismos que cuentan con un funcionamiento distinto y el bueno o mal rendimiento del mismo dependerá de la elección que hagamos. Pero para ello, ya habremos hecho los cálculos adecuados y así el intercambiador seleccionado pueda superar nuestras expectativas de forma positiva.

2.1.2 Investigaciones nacionales

Gómez (2014), Universidad Nacional de Trujillo, La Libertad, en su tesis: *modelamiento y simulación del sistema de evaporación de jugo clarificado para la etapa de ampliación de molienda de la Empresa Agroindustrial San Jacinto*, cuyo objetivo fue desarrollar un simulador por computadora para el sistema de quintuple efecto de la empresa Agroindustrial San Jacinto. Llegando a concluir que el coeficiente de transferencia de calor disminuye progresivamente en el tren de evaporación conforme aumenta la viscosidad del jugo debido al incremento de sólidos disueltos (brix), esto se acentúa aún más cuando se realiza sangrados de vapor vegetal. Las extracciones de vapor vegetal no modifican el flujo de jarabe o meladura ni el brix de salida en el quinto efecto, solamente se altera los flujos de jugo y sus respectivos brix en las etapas intermedias acomodándose al tiempo de residencia. El sangrado de vapor vegetal en los tres primeros efectos reduce el consumo de vapor de escape en un 11%. El calentamiento previo del jugo claro a la temperatura de operación del primer efecto y las extracciones de vapor aumentan la economía global del vapor de escape en un 12%. Además, el ingenio se hace más eficiente energéticamente ya que reduce su consumo de vapor de 0,44 a 0,39 Ton/ Ton de caña molida. Las extracciones en los tres primeros efectos (caso 5) reducen el consumo de agua en el condensador en un 42% con respecto a un único sangrado en el pre evaporador (caso 1). Se cuenta con la mayor cantidad de área requerida para cada efecto del sistema de evaporación, excepto para el 2do efecto

(caso 4 y 5); y 5^{to} efecto (caso 1,2 y 3). El caso 5 resulta el más eficiente energéticamente dado que reduce el consumo de vapor de escape, el consumo de agua industrial y aumenta la economía global de vapor.

Panana (2013), Universidad Nacional del Callao, Lima, en su tesis: *diseño de evaporadores de múltiple efecto, conectados en serie*, cuyo objetivo fue diseñar evaporadores de múltiple efecto, conectados en serie. Llegando a concluir que de acuerdo a los resultados obtenidos mediante la aplicación del primer método de cálculos de diseño de los evaporadores las desviaciones de las áreas de los evaporadores con la media son de 4 %, la solución será más exacta, si se tiene una mejor precisión de los coeficientes de transmisión de calor. > Los kg de La evaporación de vapor de agua por kg de vapor de agua alimentado al sistema es de 2,06 kg, esto indica que alguno de los datos empleadas, puede conducir a errores. En este caso la desviación se debe a la gran cantidad de calor que es necesaria para calentar la alimentación hasta el punto de ebullición en el primer efecto. Este método es muy pesado cuando se trata de tres efectos. Mediante la aplicación del segundo método, de los resultados obtenido en el diseño de los evaporadores, la desviación máxima de las áreas de los evaporadores respecto al área media es de 4 m², es decir 2 %, por lo que la distribución de las caídas de temperaturas en los evaporadores es satisfactoria. Se tiene que el efecto I que a medida que se eleva la temperatura de ebullición, hay que aumentar la cantidad de vapor de calentamiento para calentar la alimentación.

Joaquín & Márquez (2004), Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, en su tesis: *análisis de los parámetros de operación mediante modelamiento y simulación, del sistema de evaporadores de la empresa Agroindustrial Laredo S.A.A.*, cuyo objetivo fue el análisis de la influencia que posee la variación del flujo de jugo claro frente a la concentración de jugo evaporado, elevación del punto de ebullición, factor de Dessin, tiempo de residencia de jugo, coeficiente de transferencia de calor, vapor vegetal empleado y obtenido y economía

de vapor de cada efecto de los 5 efectos que posee el sistema de evaporadores de la Empresa Agroindustrial Laredo S.A.A. Asimismo de la influencia de la temperatura de jugo claro al entrar al sistema de evaporadores frente a la economía global del sistema de evaporadores. Concluyo que en el sistema de evaporadores de la Empresa Agroindustrial Laredo S.A.A., el aumento en el flujo de alimentación de jugo claro con una concentración (Brix) de entrada constante, conlleva a la obtención de una menor concentración de jugo evaporado en cada efecto, a excepción del último efecto, debido a que es la concentración final fijada, la que se desea obtener. En el sistema evaporadores de la Empresa Agroindustrial Laredo S.A.A., el aumento del flujo de alimentación de jugo claro, nos permite mantener los evaporadores en mejores condiciones de operación, evitando la eventualidad de que ocurran fuertes incrustaciones, además el tiempo de residencia del flujo de jugo en el sistema de evaporadores es mucho menor. En el sistema evaporador de la Empresa Agroindustrial Laredo S.A.A., el aumento del flujo de alimentación de jugo claro en conjunto con el aumento de su temperatura cercana a su punto de ebullición, permite obtener una mejor transferencia de calor vapor-pared del tubo-jugo, con excepción del efecto 1 ya que se está consumiendo menos vapor de escape. El sistema evaporador de la Empresa Agroindustrial Laredo S.A.A., el aumento del flujo de alimentación de jugo claro en conjunto con el aumento de su temperatura cercana a su punto de ebullición, permite obtener un significativo ahorro de vapor de escape, donde la similitud entre los datos simulados y los reales presentó mayor discrepancia en la concentración de leche que en soluciones azucaradas diluidas. El simulador reporta valores en las variables de temperatura, nivel de líquido, composición del fluido, flujos de vapor, líquido concentrado, propiedades termo físicas de las soluciones, elevación del punto de ebullición y coeficiente global de transferencia de calor. Permite hacer modificaciones a las variables de entrada y correcciones al proceso mientras está en modo de ejecución. Permite a la vez guardar los datos del proceso.

Heras (2004), Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, en su tesis: *análisis de los parámetros de operación mediante modelamiento y simulación, del sistema de evaporadores de la empresa Agroindustrial Laredo S.A.A.*, cuyo objetivo fue obtener la óptima performance en un sistema de evaporación de múltiple efecto para la concentración de jugo de caña de azúcar, tomado como base el proceso realizado en la empresa agroindustrial Casa Grande, cuyo resultado obtenidos fueron: que un sistema de operación de 5 efectos con alimentación hacia adelante tiene un ahorro en vapor de proceso del orden del 206% en relación al vapor vegetal evaporado, comparado al de simple efecto. En un sistema de quintupla efecto sólo hasta el tercer efecto se emplea vapor de proceso puesto que en los dos efectos restantes sólo se hace vacío además de eliminar gases incondensables, debido a una mayor densidad del jarabe (60 °Brix.), concluye que un sistema de operación de 5 efectos con alimentación hacia adelante tiene un ahorro en vapor de proceso del orden del 206% en relación al vapor vegetal evaporado, comparado al de simple efecto. En un sistema de quintupla efecto sólo hasta el tercer efecto se emplea vapor de proceso puesto que en los dos efectos restantes sólo se tiene vacío además de eliminar gases incondensables, debido a una mayor densidad del jarabe (60 °Brix.). El número óptimo de efectos en un sistema de evaporación al vacío con alimentación hacia adelante y de tipo estándar es de cinco. El costo de función de un sistema quintupla efecto es un 33,2% comparado con un sistema de simple efecto.

Alcalde (2017), Universidad Nacional de Trujillo, en su tesis: *optimización del consumo de vapor mediante la instalación de calentadores de jugo de caña clarificado en un ingenio azucarero*, cuyos objetivos fueron, calcular el consumo de vapor en el sistema de evaporación sin la instalación de los calentadores de jugo clarificado. Determinar el consumo de vapor en el sistema de evaporación con la instalación de jugo clarificado, llegando la conclusión que el consumo de vapor de escape de 20 psig en el sistema de

evaporación sin la implementación de los calentadores de jugo clarificado es de 132 Ton/h. El consumo de vapor de escape de 20 psig en el sistema de evaporación con la implementación de los calentadores de jugo clarificado es de 120 Ton/h. Se seleccionó los dos calentadores de jugo clarificado en la marca ZANINI de fabricación brasileña de 330 m^2 de área de intercambio de calor. El consumo de vapor de escape de 20 psig en el sistema de calentamiento de jugo clarificado es de 10,9 $T n/h$. La caída de presión calculada en el calentador de jugo clarificado para el lado de los tubos y considerando 8 pasos es de 4,54. El coeficiente de transferencia de calor del calentador de jugo clarificado calculado es de 1,02 $KW m^2 / \cdot K$.

Garro (2019), Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Perú, en su tesis: *desarrollo de un simulador con Microsoft Excel para el diseño y evaluación de evaporadores de múltiple efecto en la industria azucarera*, cuyo objetivo fue desarrollar un simulador con Microsoft Excel para el diseño y evaluación de evaporadores de múltiple efecto en la industria azucarera, llegando a concluir que; las tablas desarrolladas funciona bien facilitando los datos de balance de materia y energía en el simulador, se identificaron todos los datos operacionales de entrada y salida del simulador y datos técnicos de cada evaporador, tanque flash y el sistema de evaporador de múltiple efecto, el entorno del simulador es adecuado, introduciéndose las ecuaciones de balance de materia y energía en el simulador en Microsoft Excel y los parámetros de diseño obtenidos del simulador son apropiados. El simulador permite la evaluación de parámetros de eficiencias de los evaporadores de múltiple efecto de manera adecuada.

2.1.3 Otras investigaciones

Carrizales. (2010), Universidad Autónoma de San Luis de Potosí, México en la revista académica de investigación Tlatemoani, publica el artículo *Cálculo de evaporadores de múltiple efecto, un método simplificado*, que tuvo como objetivo cuyo objetivo fue

proponer un método corto para el diseño de evaporadores de múltiple efecto, enfocándose al caso del diseño de evaporadores en los que el licor concentrado presenta una elevación en el punto de ebullición. Llegando a obtener como resultado que con el fin de comprobar la efectividad de esta metodología, se resolvió un problema típico de evaporación cuyos resultados se encuentran en la literatura. Se utilizó un programa computacional llamado EES (Engineering Equation Solver) como herramienta para la solución de este problema.

Suarez & Díaz (2011), Universidad de Oriente. Cuba, en la revista tecnológica química publica el artículo *Modelamiento matemática del área de calentadores de un central azucarero para la producción de azúcar crudo*, que tuvo como objetivo fue realizar la modelación matemática de los equipos en el área de calentadores de un ingenio azucarero. Llegando a concluir que la modelación matemática del proceso es adecuada logrando similitud entre los valores calculados por diseño y los determinados por Índices de Capacidades. Un mayor coeficiente de obstrucción calculado provoca una mayor diferencia entre el área transferencia calculada por diseño y el área de transferencia calculada por Índices de Capacidades pero también significa un mayor tiempo de operación sin necesidad de limpiar los intercambiadores. El programa desarrollado permite no solo calcular dimensiones y capacidades de los equipos sino que además permite determinar el efecto de las variables de proceso sobre el funcionamiento de los equipos y sus resultados.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Calentadores de jugo

2.2.1.1 Pérdida de calor en los calentadores de jugo

De acuerdo con el aislamiento más o menos cuidadoso del calentador (y en las baterías de calentadores, de la tubería que los une entre sí) la pérdida corresponde al rendimiento de la operación de cambio de calor llega hasta 4 u 8% en promedio 5%, en un calentador convenientemente aislado con duelas de madera. (Hugot, 1984, pág. 308)

2.2.1.2 Cálculo de calentadores

Según Hugot (1984) da las ecuaciones de cálculo para el diseño y/o evaluación de calentadores:

El cálculo de los calentadores se complica por el hecho de que si uno de los fluidos, el vapor está a temperatura constante, el segundo, es decir, el jugo, varía desde su temperatura de entrada hasta su temperatura de salida. Por esta razón se introduce en el cálculo una integral que se traduce en un logaritmo. El cálculo en esta forma es un poco más largo, pero de otra manera no es posible llegar al resultado preciso.

Todo cálculo de los calentadores está contenido en las tres fórmulas siguientes:

Cantidad de calor transmitida:

$$M = pc(T - t_0) \left(1 - e^{-\frac{ks}{pc}} \right)$$

Temperatura obtenida:

$$t = T - (T - t_0)e^{-\frac{ks}{pc}}$$

Superficie de calentamiento:

$$S = \frac{pc}{k} \ln \frac{T - t_0}{T - t}$$

M : Cantidad de calor transmitido el jugo, en kilocalorías

S : Superficie calentamiento del calentador de m²

P : Peso del jugo por calentar, en kg/h

C : Calor específico del jugo (alrededor de 0,9)

T : Temperatura el vapor caliente en grado °C

t₀ : Temperatura de entrada del jugo frío, en grado °C.

t_f : Temperatura de salida del jugo caliente en grado °C

k : Coeficiente de transmisión de calor en kcal/m²/°C/h. (pág. 308)

Valor de k: Todos los autores están de acuerdo en señalar la marcada influencia que ejerce la velocidad V, de circulación del jugo en los tubos, sobre el coeficiente de transmisión k. Sin embargo, las opiniones difieren en lo que concierne a la ley que expresa la relación de estos dos factores.

$$k = \frac{T}{0,1 + \frac{0,08}{V}}$$

k : Coeficiente de transmisión de calor en el calentador en Kcal/m²/h/°C

T : Temperatura de vapor que calienta

V : Velocidad del jugo en los tubos en m/s. (Hugot, 1984, pág. 309)

2.2.2 Cocimiento

2.2.2.1 Consumo de vapor en el cocimiento

En los tachos, si el consumo de vapor se expresa como una relación entre éste y la cantidad teórica de agua que debe evaporarse de la meladura, se verá que esta relación es sensiblemente mayor que 1. Esto se debe al agua que se emplea en la dilución de las mieles, al agua de lavado que se usa en las masas cocidas, el lavado que se usa en las masas cocidas de alto grado y al agua que se emplea para eliminar el falso grano, la suma de las cuales representa esta cantidad adicional de agua que debe evaporarse junto con la presente en la meladura. (Hugot, 1984, pág. 466)

2.2.2.2 Sistema de tres templeas

Este es el sistema que se emplea más frecuentemente. Se cuecen 3 tipos de masas cocidas: (a) Una maza cocida de pureza entre 82 a 85 que se obtiene de acuerdo con la pureza de la meladura, ya sea enteramente de meladura virgen o de un pie de templa de meladura con una adición más o menos sustancial de mieles A hacia el final de la templa. (b) Una masa cocida B de pureza entre 70 y 72, que se obtiene con un pie de templa de meladura virgen y se complementa con mieles A. (c) Una masa cocida C de pureza de

alrededor de 60, que se obtiene con un pie de meladura y que se complementa con mieles B.

(Hugot, 1984, pág. 473)

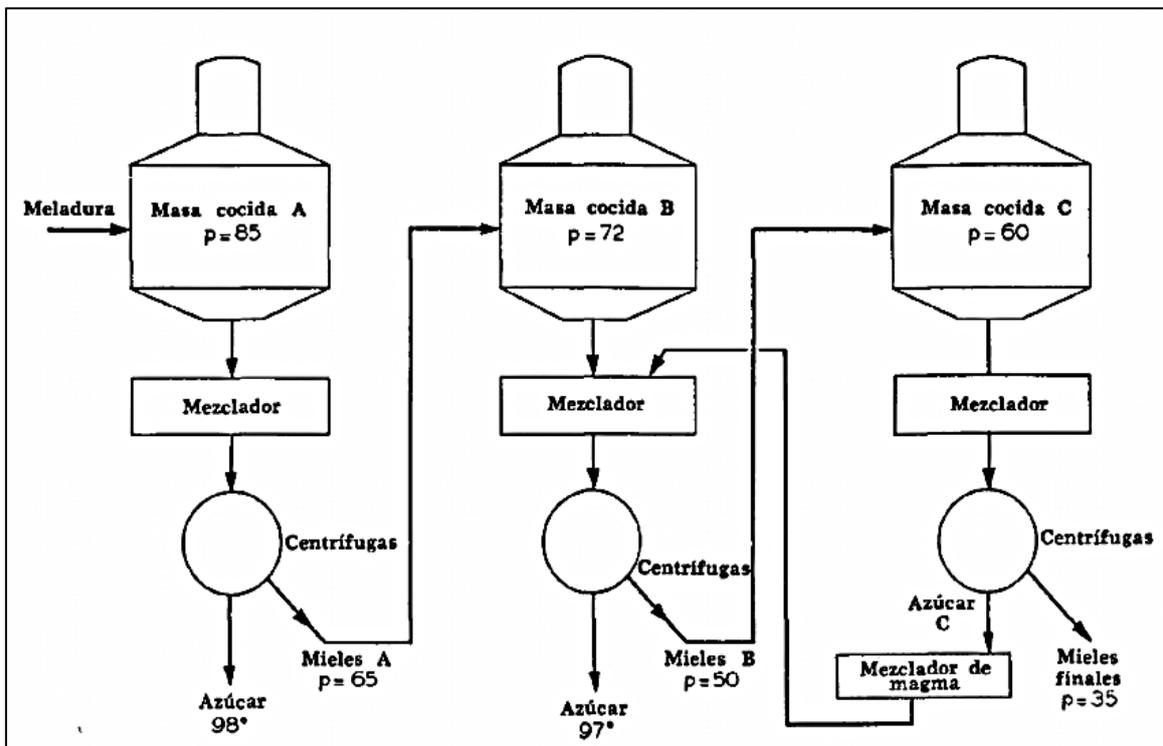


Figura 1. Sistema de tres templas

Fuente: (Hugot, 1984, pág. 474)

2.2.3 Evaporadores de cuádruple efecto

La purificación del jugo produjo jugo claro. Este jugo es azúcar disuelta en agua, junto con ciertas impurezas, cuando se ha quitado ya la mayor cantidad posible de estas impurezas queda por eliminar el agua, esta es objeto de la evaporación. (Hugot, 1984, pág. 345)

El agua o el jugo hierven a 90 °C a 23 cm de vacío; a 80 °C a 40 cm de vacío; a 70 °C a 52 cm de vacío, etc., es posible entonces, crear la diferencia de temperatura necesaria utilizar el vapor del jugo producido por el primer cuerpo, para calentar el jugo encerrado en el segundo; el vapor producido por éste para calentar el tercero y así sucesivamente. Esta solución tiene el inconveniente de exigir las instalaciones necesarias para crear el vacío. Sin embargo; la ebullición al vacío tiene 2 grandes ventajas: a) Aumenta la diferencia total de

temperatura entre vapor y jugo en una cantidad igual a la caída del punto de ebullición del jugo entre la presión del primer cuerpo y la del último, b) Permite continuar la evaporación a temperaturas menos peligrosas desde el punto de vista de la inversión y de la coloración del jugo, cuando el jugo está más concentrado y más viscoso. . (Hugot, 1984, pág. 347)

2.2.3.1 Límite entre la evaporación y el cocimiento

EL punto de cristalización del jugo de caña se encuentra entre los 78 y los 80 °Brix (41 a 42 °Be). Teóricamente podría llevarse la evaporación hasta 72 o 75 °Brix. En la práctica los tacheros tienen necesidades de una meladura capaz de disolver cristales, para el caso en que formen falsos granos al principio de la templa, esta condición es indispensable para obtener un buen cocimiento. Por este motivo nunca se pasa de un brix = 70°. La evaporación se prevé y se ajusta para que el brix de la meladura permanezca comprendido entre: Fabricación de azúcar crudo: 60 a 70 °Brix (32 a 37 Bé) y Fabricación de azúcar blanco: 50 a 60 °Brix (27 a 32 Bé). (Hugot, 1984, pág. 346)

2.2.3.2 Cantidad de agua a evaporar

En el manual para ingenieros azucareros Hugot (1984) afirma sobre las ecuaciones fundamentales de balance de materia en la estación de evaporadores:

Sea

E : peso del agua a evaporar por T.C.

J : peso del agua obtenido/T.C.

S : Peso de la meladura/T.C. a la salida del múltiple efecto.

B_j : Brix del jugo

B_s : Brix de la meladura

Escríbase que el peso de los materiales disueltos es el mismo antes y después de la evaporación.

De donde:

$$J \times B_j = S \times B_s$$

$$S = J \frac{B_j}{B_s}$$

$$E = J - S = J \left(1 - \frac{B_j}{B_s} \right)$$

Se ve en seguida la importancia de la evaporación en la fabricación de azúcar; es la operación que elimina, con mucho, el mayor peso de material: 80% del peso de la caña. Por la gran cantidad de calor latente de vaporación del agua es también la operación que maneja el número más grande de calorías. (Hugot, 1984, pág. 346)

2.2.3.3 Límite superior de la temperatura

Existe una cierta temperatura crítica a partir de la cual el azúcar del jugo se carameliza provocando a la vez una pérdida de sacarosa y una coloración que permanecerá hasta los cristales de azúcar. Noel Deer considera que la Temperatura límite para el jugo de la caña, es de 127 °C, Tromp indica que 130 °C es la temperatura máxima que debe tener el vapor de calentamiento, correspondiente a unos 125 °C en el jugo. (Hugot, 1984, pág. 347)

Tabla 1
Temperaturas máximas en el múltiple efecto

Múltiple efecto ordinario	120 °C	(1,0 kg/cm ²)
Kestner	125 °C	(1,3 kg/cm ²)
Estas temperaturas corresponden a una temperatura del vapor de calentamiento entrando a la calandria del primer cuerpo de aproximadamente		
Múltiple efecto ordinario	125 °C (1,3 kg/cm ²)	a 130 °C (1,7 kg/cm ²)
Kestner	130 °C (1,7 kg/cm ²)	a 135 °C (2,2 kg/cm ²)

Fuente: (Hugot, 1984, pág. 347)

2.2.3.4 Límite inferior de la temperatura

El límite de la escala de temperatura en la cual funciona un múltiple efecto, es la temperatura de ebullición correspondiente al vacío que se ejerce en el último cuerpo. En las fábricas de azúcar se obtiene fácilmente un vacío de 66 a 68 cm que correspondiente a una temperatura de 47 a 52 °C. Sin embargo, por diversos motivos, es conveniente mantener al vacío entre 62 y 65 cm (58 a 53°). Normalmente se calculan 55 °C, es decir, 64 cm, y son, esta temperatura y este vacío, los que se recomiendan en ese lugar. (Hugot, 1984, pág. 348)

2.2.3.5 Temperatura de la meladura

La meladura que se encuentra en el último cuerpo llega a él con un brix cercano a 40° y sale, el brix medio está entre 50 y 55°. La elevación del punto de ebullición correspondiente a este brix y a este vacío es de aproximadamente 2 °C. (Figura 2) Es conveniente sumar a estos 2 °C la elevación del punto de ebullición debida a la presión hidrostática. Así, los 55 °C existentes en el evaporador del último cuerpo correspondiente a 58 a 60 °C de temperatura media en la meladura del mismo. (Hugot, 1984, pág. 348)

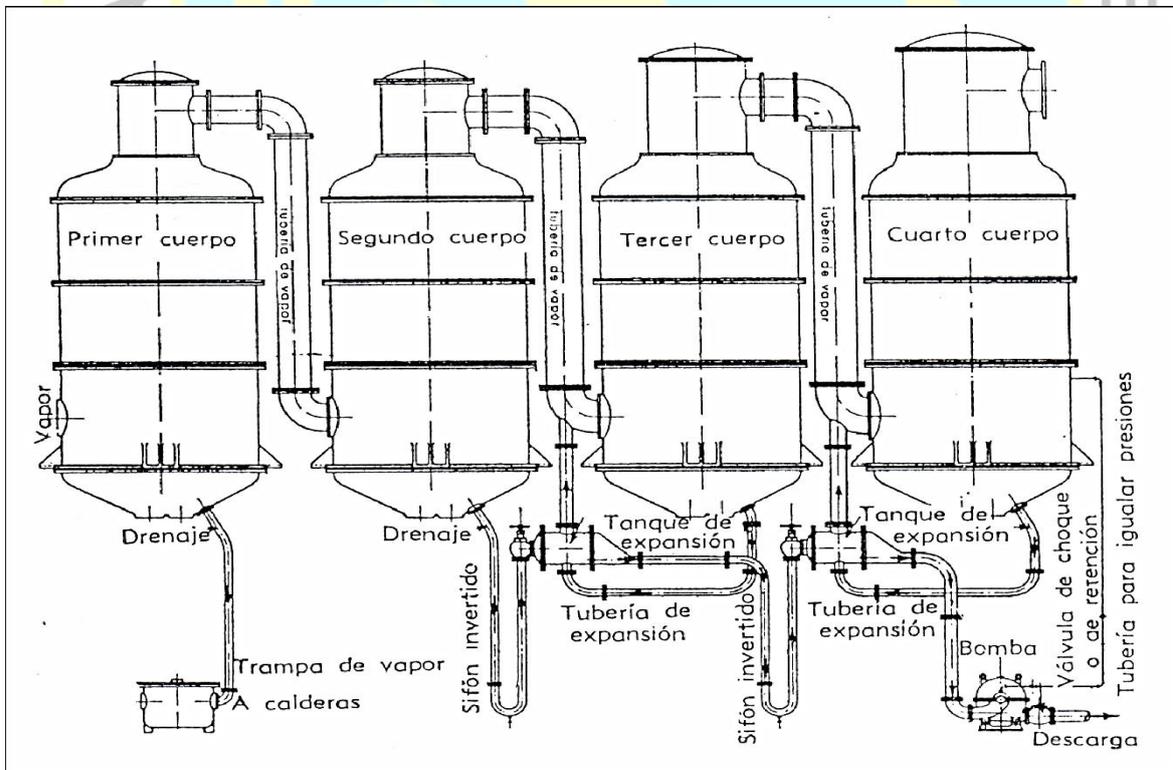


Figura 2. Sistema de evaporación súbita del condensado

Fuente: (Chen, 1997, pág. 266)

2.2.3.6 Cálculo de reevaporizados

Cuando se tiene condensado caliente o agua hirviendo, presurizados, y se libera a una presión más baja, parte de esos líquidos se vuelven a evaporar, y a esto es a lo que se le llama vapor flash o vapor secundario. El porcentaje del condensado que se convertirá en Vapor Flash se puede calcular usando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Vapor Flash} = \frac{SA - SB}{LL} 100$$

SA : Calor Sensible del condensado a alta presión, antes de ser descargado.

SB : Calor Sensible del condensado a baja presión, a la cual se descarga.

LL : Calor Latente del vapor a baja presión, a la cual se descargó. (Armstrong, 2002, pág. 5)

2.2.3.7 Consumo de vapor en los evaporadores

1 kg de vapor es suficiente para evaporar aproximadamente 1 kg de jugo. (Hugot, 1984, pág. 466)

2.3 Definición de términos básicos

Brix: Los grados Brix, determinan el porcentaje de sólidos solubles presentes en una disolución, en el caso de la industria alimentaria, nos indica la cantidad de sacarosa presente en la muestra a analizar. Así, una disolución 25 °Bx, contendrá 25 gramos de sacarosa por cada 100 gramos de disolución, es decir, 25 gramos de sacarosa y 75 gramos de disolvente. (medidordeph.com, 2014)

Calentadores: La calefacción del guarapo o el licor se realiza por lo general en intercambiadores de calor del tipo de casco y tubos, mismos que se fabrican en una amplia variedad de tamaños y configuraciones. (Hugot, 1984, pág. 241)

Evaporadores a múltiple efecto: son equipos de evaporación secundaria que trabajan siempre a múltiple efecto (desde 3 a 6 vasos). Consumen vapor de escape o vegetal de los evaporadores primarios hasta 15 psig. y pueden entregar vapores de extracción a

calentadores, cuya presión dependerá del o de los efectos donde se practique(n) la(s) extracción(es). (IFAI, s.f., pág. 2)

Industria azucarera: Empresa cuyo negocio es la producción y comercialización del azúcar. (Wikipedia, 2011)

Jugo encalado: El jugo mixto proveniente de los molinos pasa a un tanque llamado de encalado, donde es tratado con una solución cal (5 °Baumé) con la finalidad de aumentar el pH desde 4,5 hasta 7,2 y 7,4 aproximadamente, este producto reacciona con los fosfatos contenidos en el jugo formando un compuesto con el nombre de fosfato tricálcico, que forma sales precipitables de gran superficie de contacto y por ende de gran poder en la clarificación de los jugos. (Chacón, 2017)

Calentadores de jugo: Son equipos destinados a calentar continuamente el jugo alcalizado hasta un nivel cercano a su punto de ebullición (105 °C) que viene del tanque alcalizador utilizando como medio de calentamiento el vapor de escape o vapor vegetal. (Jeri, 2013)

Calor del líquido Saturado: Ésta es la cantidad de calor requerida para elevar la temperatura de un kilogramo de agua desde 0° C hasta el punto de ebullición a la presión y temperatura mostradas. Se expresa en kJ/kg (o en kcal/kg). (Armstrong, 2002, pág. 4)

Calor latente o calor de vaporización: Es la cantidad de calor (expresada en kJ/kg o kcal/h) que se requiere para cambiar un kilogramo de agua hirviendo a un kilogramo de vapor. Esta misma cantidad de calor se libera cuando un kilogramo de vapor se condensa y se vuelve un kilogramo de agua. El calor latente es diferente para cada combinación de presión/temperatura. (Armstrong, 2002, pág. 4)

Calor total del vapor: Es el calor total en vapor arriba de 0° C. Es igual a la suma del calor del líquido saturado y el calor latente, expresado en kJ/kg o en kcal/kg. (Armstrong, 2002, pág. 4)

Configuración: es un conjunto de datos que determina el valor de algunas variables de un programa o de un sistema operativo. estas opciones generalmente son cargadas en su inicio y en algunos casos se deberá reiniciar para poder ver los cambios, ya que el programa no podrá cargarlos mientras se esté ejecutando, si la configuración aún no ha sido definida por el usuario (personalizada), el programa o sistema cargará la configuración predeterminada. (Wikipedia, 2014)

Evaporador: está constituido esencialmente por una calandria tubular que tiene la función de intercambiar temperatura. (Hugot, 1984, pág. 339)

Presiones absoluta y relativa: Presión absoluta es la presión (en bar) medida con respecto al vacío perfecto. Presión relativa o de manómetro es la presión (en bar) medida con respecto a la presión atmosférica, la cual es igual a 1,01 bar absoluta. Presión relativa más 1,01 es igual a la presión absoluta. Igualmente, presión absoluta menos 1,01 bar es igual a la presión relativa. (Armstrong, 2002, pág. 4)

Tachos al vacío: el principio del tacho al vacío es análogo al de uno de los cuerpos de un evaporador, los tubos son más cortos y de mayor diámetro que en los evaporadores. (Hugot, 1984, pág. 441)

Vapor de escape o vegetal de baja presión, procedente de evaporadores primarios o extracciones de evaporadores para diferentes usos del proceso (IFAI, s.f., pág. 3)

Vapor: El vapor es el estado en el que se encuentra un gas cuando se halla a un nivel inferior al de su punto crítico; éste hace referencia a aquellas condiciones de presión y temperatura por encima de las cuales es imposible obtener un líquido por compresión. Si un gas se encuentra por debajo de ese punto, esto significa que es susceptible de condensación a través de una reducción de su temperatura (manteniendo la presión constante) o por vía de la presurización (con temperatura constante). (Pérez & Gardey, 2010)

Vapor Flash: Cuando se tiene condensado caliente o agua hirviendo, presurizados, y se libera a una presión más baja, parte de esos líquidos se vuelven a evaporar, y a esto es a lo que se le llama Vapor Flash o Vapor Secundario. (Armstrong, 2002, pág. 5)

Vapor sobrecalentado: El vapor sobrecalentado se crea por el sobrecalentamiento del vapor saturado o húmedo para alcanzar un punto mayor al de saturación. Esto quiere decir que es un vapor que contiene mayor temperatura y menor densidad que el vapor saturado en una misma presión. El vapor sobrecalentado es usado principalmente para el movimiento-impulso de aplicaciones como lo son las turbinas, y normalmente no es usado para las aplicaciones de transferencia de calor. (TLV Compañía especialista de vapor, s.f.)

Vapor Saturado: es vapor puro a una temperatura igual a la temperatura a que hierve el agua a una presión dada. (Armstrong, 2002, pág. 4)

2.4 Formulación de hipótesis.

2.4.1 Hipótesis general

- El análisis del consumo de vapor a diferentes configuraciones de funcionamiento de los evaporadores de cuádruple efecto permite identificar la configuración de funcionamiento más eficiente en la industria azucarera.

2.4.2 Hipótesis específicas

- Los datos requeridos de operación y configuración de equipos corresponde al evaporador cuádruple efecto, calentadores de jugo I, II, II y tachos A, B, C
- Las presiones de vapor saturado disponibles en el evaporador de cuádruple son el vapor calefacción, vapor del primer, segundo, tercer y cuarto evaporador; siendo sus propiedades termodinámicas determinadas.
- El consumo de vapor en los calentadores y tachos se determinan para todas las presiones disponibles en el evaporador de cuádruple efecto.

- Las configuraciones de funcionamiento viables técnicamente se consideran aquellas donde la temperatura del vapor de calefacción es superior a la del material a calentar y/o concentrar.
- El cálculo del consumo de vapor se da en parámetros respecto a la caña limpia y su análisis reafirma que existen mejores configuraciones de funcionamiento de los evaporadores de cuádruple efecto con los calentadores y tachos



CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1 Diseño metodológico

La diversidad y complejidad de los hechos y fenómenos de la realidad (social y natural) han conducido a diseñar y elaborar numerosas y variadas estrategias, para analizar y responder a los problemas de investigación según su propia naturaleza y características. Así, por ejemplo, tenemos: los diseños experimentales y los diseños no experimentales, ambos con igual importancia y trascendencia en el plano científico. (Carrasco, 2017, pág. 59)

3.1.1 Tipo de investigación

Dependiendo del objetivo de la investigación que se va a realizar, podemos determinar el tipo de investigación al que corresponde. Esta labor debe realizarse antes de formular el plan de investigación, con el fin de tener bien definido lo que se piensa hacer y qué tipo de información se debe obtener, ya que este documento constituye una secuencia estructurada de fases y operaciones que se articulan en cadena. (Carrasco, 2017, pág. 43)

Tipo de investigación: Investigación aplicada.

3.1.2 Nivel de investigación

Siendo la producción de los nuevos conocimientos y la resolución de problemas críticos, acciones estratégicas, que en esencia representan el propósito fundamental de la investigación científica, deben realizarse guardando un cierto orden progresivo y escalonado. (Carrasco, 2017, pág. 41)

Nivel de investigación: Investigación descriptiva explicativa

3.1.3 Diseño

No experimental transversal descriptivo explicativo

3.1.4 Enfoque

La investigación es cualitativa en la identificación de las presiones disponibles en la planta y las diferentes configuraciones de trabajo de los principales consumidor de vapor como calentadores, tachos y evaporador. Cuantitativa en el análisis del consumo de vapor a dichas configuraciones de funcionamiento de los evaporadores de cuádruple efecto con los calentadores y tachos en la industria azucarera.

Enfoque: Enfoque Mixto, cualitativo y cuantitativo

3.2 Población y muestra

3.2.1 Población

Es el conjunto de todos los elementos (unidades de análisis) que pertenecen al ámbito espacial donde se desarrolla el trabajo de investigación. (Carrasco, 2017, pág. 236)

Población: Flujos de vapor en los evaporadores de cuádruple efecto, calentadores y tachos en la industria azucarera.

3.2.2 Muestra

La muestra es una parte o fragmento representativo de la población, cuyas características son las de ser objetiva y reflejo fiel de ella, de tal manera que los resultados obtenidos en la muestra puedan generalizarse a todos los elementos que conforman dicha población. (Carrasco, 2017, pág. 237)

Muestra: Flujos de vapor en los evaporadores de cuádruple efecto, calentadores y tachos en la industria azucarera.

3.3 Operacionalización de variables e indicadores

Variable independiente: configuraciones de funcionamiento de los evaporadores de cuádruple efecto
Variable dependiente: análisis del consumo de vapor

Tabla 2

Operacionalización de variables

VARIABLES	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES		
	DIMENSIÓN	INDICADOR	ESCALA
VARIABLE INDEPENDIENTE 1. Configuraciones de funcionamiento de los evaporadores de cuádruple efecto	1.1 Condiciones operativas y configuración de equipos.	Evaporador cuádruple efecto	Nominal
		Presión de vapor calefacción primer evaporador	Razón
		Presión de vacío cuarto evaporador	Razón
		Brix del Jugo clarificado	Razón
		Brix del Jarabe	Razón
		Numero de calentadores de jugo encalado	Razón
		Temperatura del jugo entrada al calentador I	Razón
		Temperatura del jugo salida del calentador I	Razón
		Temperatura del jugo salida del calentador II	Razón
		Temperatura del jugo salida del calentador III	Razón
		Sistema de tres temple tachos	Nominal
		Ratio de consumo de vapor en los tachos	Razón
		Presión de vapor calefacción primer evaporador	Razón

		Presión del primer evaporador	Razón	
		Presión del segundo evaporador	Razón	
1.2	Presiones de vapor saturado disponibles	Presión del tercer evaporador	Razón	
		Presión de vacío cuarto	Razón	
1.3	Consumo de vapor en los calentadores y tachos	Vapor calentador I	Razón	
		Vapor calentador II	Razón	
		Vapor calentador o III	Razón	
		Vapor tachos A, B y C	Razón	
1.4	Configuraciones de funcionamiento	Identificación de las configuraciones viables técnicamente	Nominal	
VARIABLE INDEPENDIENTE	2.1	Consumo de vapor	Consumo de vapor en las viables técnicamente	Razón
2. Análisis del consumo de vapor	2.2	Análisis del consumo de vapor	Análisis del consumo de vapor en las viables técnicamente	Nominal

Fuente: Elaboración propia

3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1 Técnicas a emplear

El estudio dada la naturaleza de la investigación, principalmente se utilizaron técnicas de observación en visitas a ingenios azucareros y de gabinete en la recopilación de datos y cálculos. En consecuencia, se utilizaron las siguientes técnicas:

a) Documentales.

La investigación de carácter documental se apoya en la recopilación de antecedentes a través de documentos gráficos de cualquier índole y de diversos autores, en los que el investigador fundamenta y complementa su investigación. (Ledesma, 2014)

b) Observación.

La observación consiste en el uso sistemático de nuestros sentidos orientados a la captación de la realidad que queremos estudiar. A través de sus sentidos el hombre capta la realidad que lo rodea, que luego organiza intelectualmente. (Sabino, 1992, pág. 111)

3.4.2 Descripción de los instrumentos

Dada la naturaleza de las técnicas utilizadas, se utilizó los siguientes instrumentos:

Para las técnicas documentales

- *Fuentes bibliográficas:* Enciclopedias, diccionarios, guías, manuales, libros de textos, tesis, revistas, normas técnicas, catálogo de equipos.
- *Fuentes iconográficas:* Diapositivas, videos.
- *Fuentes magnéticas:* Equipo de cómputo, CD-ROM

Para técnicas de observación.

- Lista de cotejo
- Ficha de observación.

3.5 Técnicas para el procesamiento de la información

Se utilizaron técnicas de balance de materia y energía para procesar la información de las diferentes configuraciones de funcionamiento de los evaporadores de cuádruple efecto con los calentadores de jugo y tachos.

Se utilizaron las herramientas de Microsoft Excel para simplificar los cálculos a través de la adaptación del simulador presentado por Garro (2019) adecuándolo a los requerimientos y consideraciones de operación consideradas inicialmente.

Se tiene técnicas para el procesamiento de la información:

Clasificación: Se clasificaron los datos disponibles concernientes a la operación de los evaporadores de cuádruple efecto, calentadores y tachos en los ingenios azucareros

Registro: Se utilizaron fichas elaboradas con anticipación que permitieron una correcta interpretación para su posterior tratamiento.

Tratamiento: Los datos registrados, se utilizaron en los balances de materia y energía, utilizando apropiadamente las ecuaciones en Microsoft Excel para acelerar los cálculos repetitivos.

Presentación: Los cálculos de consumo de vapor fueron desarrollados en Microsoft Excel, sus resultados con las herramientas apropiadas se tabularon y representaron apropiadamente para su posterior interpretación. Para las gráficas de las principales configuraciones de operación de los evaporadores conjuntamente con los calentadores y tachos se utilizó Corel Draw.

CAPITULO IV

RESULTADOS

4.1 Datos de operación de la planta para el análisis de consumo de vapor

Se delimitaron los datos de operación considerados en el análisis de consumo de vapor a diferentes configuraciones de funcionamiento de los evaporadores de cuádruple efecto con los calentadores de jugo y tachos:

Evaporador de cuádruple efecto

JC%CL :	% Jugo de Clarificado de la caña limpia	= 95 %
Brix _{JC} :	°Brix del jugo clarificado	= 15 °
Brix _J :	°Brix del jarabe	= 65 °
P ₀ :	Presión del vapor de calefacción primer evaporador	= 25 Psig
P ₄ :	Presión de vacío en el cuarto evaporador	= 25 pulg Hg.

Tachos

Templas :	Sistema de templeas	= 3 (A, B y C)
V _t :	Vacío en los tachos	= 25 pulg. Hg
AETachos%CL :	% Agua evaporada en tachos de la caña limpia	= 8,10 % (Anexo 2)

Calentadores de jugo

JM%CL :	% Jugo de mezclado de la caña limpia	= 100 %
Brix _{JM} :	°Brix del jugo mezclado	= 15 °
N _c :	Numero de calentadores de jugo encalado	= 3
T ₀ :	Temperatura del jugo de ingreso al calentador I	= 28 °C

T1 : Temperatura del jugo de salida del calentador I = 45 °C

T2 : Temperatura del jugo de salida del calentador II = 70 °C

T3 : Temperatura del jugo de salida del calentador III = 105 °C

$AE_{\text{tachoA}}\%J$: % de agua evaporada en tacho A respecto al jarabe = 24,83 %

$AE_{\text{tachoB}}\%J$: % de agua evaporada en tacho B respecto al jarabe = 5,81 %

$AE_{\text{tachoC}}\%J$: % de agua evaporada en tacho C respecto al jarabe = 6,18 %

$AE_{\text{tachos}}\%J$: % de agua evaporada en tachos respecto al jarabe = 36,83 %

El ratio de vapor consumido en tachos respecto al agua evaporada:

Spencer considera de 1,2 a 1,5.

Hugot considera 1,5 y

Chen 1,35.

Considerándose por tanto 1,5 para los cálculos de vapor en tachos.

4.2 Presiones de vapor saturado disponibles

Las presiones de vapor saturado disponibles para el análisis de consumo, dependen de las presiones de vapor vegetal producidos en el múltiple efecto, en tal sentido considerando los datos operativos anteriormente indicados, se tiene la tabla 3, donde se observa un 37,27 psig de caída de presión total de la estación de evaporador de cuádruple efecto.

Tabla 3.

Caída total de presión en los evaporadores

	P. manométricas		P. absolutas	
	Psig	Pulg hg	Psi	Kg/cm ²
Presión al primer evaporador	25,00	-	39,69	2,7910
Vacío en el cuarto evaporador	-12,27	25	2,42	0,1699
Caída de presión en el cuádruple	37,27		37,27	2,6211

Fuente: Elaboración propia

En base a la información especializada de caída de presión en un cuádruple efecto (anexo 6), se calcula la presión en cada evaporador del cuádruple efecto, obteniéndose las presiones de vapor vegetal que se indican en la tabla 4:

Tabla 4.
Presión de vapor en los evaporadores disponibles

Cuerpo	Distribución Presión	Caída P. Total Psi	Caída Cuerpo Psi	Presión de vapor disponibles		
				Psig	Kg/cm ²	Pulg.Hg
Calefacción 1er evaporador				Po =25,00	1,7580	
1	11/40	37,27	10,25	P1 = 14,75	1,0372	-
2	21/80	37,27	9,78	P2 = 4,97	0,3492	-
3	19/80	37,27	8,85	P3 = -3,88	-0,2734	7,92
4	9/40	37,27	8,39	P4 = -12,27	-0,8631	25,00

Fuente: Elaboración propia

Considerando las tablas de vapor saturado, se determina las propiedades termodinámicas del vapor saturado disponibles en el evaporador de cuádruple efecto, que se indican en la tabla 5.

Tabla 5.
Propiedades termodinámicas del vapor saturado disponibles

Cuerpo	Presión Man Psig	Propiedades termodinámicas del vapor				
		Temp. °C	Entalpia (kcal/kg) Hl	Hlv	Hv	Vol esp. m ³ /kg
1 ^{er} evap.	Po =25,00	130,42	131,05	519,31	650,36	0,66
1	P1 = 14,75	120,69	121,10	525,90	647,01	0,87
2	P2 = 4,97	108,33	108,62	534,05	642,67	1,27
3	P3 = -3,88	91,59	91,68	544,71	636,38	2,23
4	P4 = -12,27	55,95	56,02	566,01	622,02	9,24

Fuente: Elaboración propia

4.3 Consumo de vapor en calentadores y tachos a las presiones disponibles.

El vapor requerido en los calentadores de jugo I, II y III se calculó siguiendo la metodología dada en el anexo 4, asimismo el vapor requerido en los tachos A, B y C se calculó en base a los parámetros obtenidos de un balance de materiales que se detallan en el anexo 2 y 3. En la tabla 6 se muestran los consumos de vapor para todas los calentadores, tachos y evaporador de cuádruple efecto a las presiones disponibles en la planta.

Tabla 6.

Consumo de vapor en % respecto a la caña limpia a las presiones disponibles.

	Po	Pi	P2	P3	P4
Presión (psig)	25,00	14,75	4,97	-3,88	-0,8631
Presión (pulg. Hg)				7,92	25
Entalpia de Evaporación	519,31	525,90	534,05	544,71	566,01
Calentador I	3,00	2,96	2,92	2,86	2,75
Calentador II	4,41	4,35	4,29	4,20	4,05
Calentador III	6,17	6,10	6,00	5,89	5,66
Tachos A, B y C	13,94	13,76	13,55	13,29	12,79

Fuente: Elaboración propia

4.4 Configuraciones de funcionamiento de los evaporadores de cuádruple efecto

En la figura 3, se representa el evaporador de cuádruple efecto y los tres calentadores con los tachos como consumidores. Indicándose las corrientes de entrada y salida de vapor para analizar las diferentes configuraciones.

En consideración a las temperaturas del vapor de calefacción dada en la tabla 5 y del material a procesar, se indican en la tabla 7 las configuraciones de funcionamiento viables técnicamente de los evaporadores de cuádruple efecto con los calentador I, calentador II, calentador III y tachos.

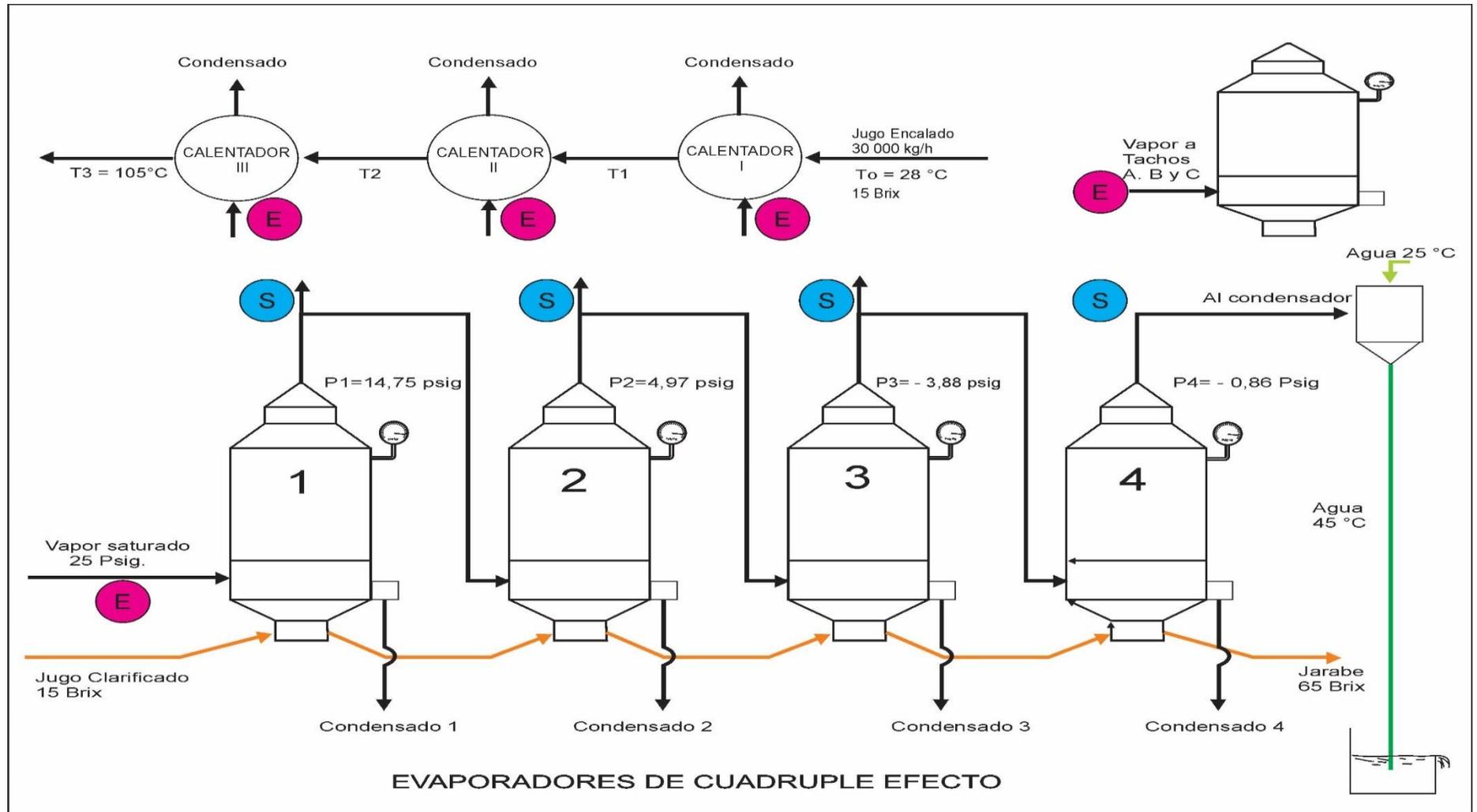


Figura 3. Consumidores de vapor para las diferentes configuraciones

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7.

Detalle de presiones de las configuraciones de consumo de vapor

Config. N°	Calentador de jugo encalado			Tachos A, B y C	Evaporador
	I	II	III		
1	25 psig	25 psig	25 psig	25 psig	25 psig
2	14,75 psig	25 psig	25 psig	25 psig	25 psig
3	4,97 psig	25 psig	25 psig	25 psig	25 psig
4	-3,88 psig	25 psig	25 psig	25 psig	25 psig
5	14,75 psig	14,75 psig	25 psig	25 psig	25 psig
6	4,97 psig	14,75 psig	25 psig	25 psig	25 psig
7	-3,88 psig	14,75 psig	25 psig	25 psig	25 psig
8	4,97 psig	4,97 psig	25 psig	25 psig	25 psig
9	-3,88 psig	4,97 psig	25 psig	25 psig	25 psig
10	-3,88 psig	-3,88 psig	25 psig	25 psig	25 psig
11	14,75 psig	14,75 psig	14,75 psig	25 psig	25 psig
12	4,97 psig	14,75 psig	14,75 psig	25 psig	25 psig
13	-3,88 psig	14,75 psig	14,75 psig	25 psig	25 psig
14	4,97 psig	4,97 psig	14,75 psig	25 psig	25 psig
15	-3,88 psig	4,97 psig	14,75 psig	25 psig	25 psig
16	-3,88 psig	-3,88 psig	14,75 psig	25 psig	25 psig
17	25 psig	25 psig	25 psig	14,75 psig	25 psig
18	14,75 psig	25 psig	25 psig	14,75 psig	25 psig

Config. N°	Calentador de jugo encalado			Tachos A, B y C	Evaporador
	I	II	III		
19	4,97 psig	25 psig	25 psig	14,75 psig	25 psig
20	-3,88 psig	25 psig	25 psig	14,75 psig	25 psig
21	14,75 psig	14,75 psig	25 psig	14,75 psig	25 psig
22	4,97 psig	14,75 psig	25 psig	14,75 psig	25 psig
23	-3,88 psig	14,75 psig	25 psig	14,75 psig	25 psig
24	4,97 psig	4,97 psig	25 psig	14,75 psig	25 psig
25	-3,88 psig	4,97 psig	25 psig	14,75 psig	25 psig
26	-3,88 psig	-3,88 psig	25 psig	14,75 psig	25 psig
27	14,75 psig	14,75 psig	14,75 psig	14,75 psig	25 psig
28	4,97 psig	14,75 psig	14,75 psig	14,75 psig	25 psig
29	-3,88 psig	14,75 psig	14,75 psig	14,75 psig	25 psig
30	4,97 psig	4,97 psig	14,75 psig	14,75 psig	25 psig
31	-3,88 psig	4,97 psig	14,75 psig	14,75 psig	25 psig
32	-3,88 psig	-3,88 psig	14,75 psig	14,75 psig	25 psig
33	25 psig	25 psig	25 psig	4,97 psig	25 psig
34	14,75 psig	25 psig	25 psig	4,97 psig	25 psig
35	4,97 psig	25 psig	25 psig	4,97 psig	25 psig
36	-3,88 psig	25 psig	25 psig	4,97 psig	25 psig
37	14,75 psig	14,75 psig	25 psig	4,97 psig	25 psig
38	4,97 psig	14,75 psig	25 psig	4,97 psig	25 psig

Config. N°	Calentador de jugo encalado			Tachos A, B y C	Evaporador
	I	II	III		
39	-3,88 psig	14,75 psig	25 psig	4,97 psig	25 psig
40	4,97 psig	4,97 psig	25 psig	4,97 psig	25 psig
41	-3,88 psig	4,97 psig	25 psig	4,97 psig	25 psig
42	-3,88 psig	-3,88 psig	25 psig	4,97 psig	25 psig
43	14,75 psig	14,75 psig	14,75 psig	4,97 psig	25 psig
44	4,97 psig	14,75 psig	14,75 psig	4,97 psig	25 psig
45	-3,88 psig	14,75 psig	14,75 psig	4,97 psig	25 psig
46	4,97 psig	4,97 psig	14,75 psig	4,97 psig	25 psig
47	-3,88 psig	4,97 psig	14,75 psig	4,97 psig	25 psig
48	-3,88 psig	-3,88 psig	14,75 psig	4,97 psig	25 psig

Fuente: Elaboración propia

4.5 Consumo de vapor en los equipos a diferentes configuraciones

En la tabla 8, 9 y 10, se calcula el consumo de vapor en % respecto a la caña limpia (CL) de las diferentes configuraciones de funcionamiento viables técnicamente utilizando las ecuaciones y programas en Excel dadas en el anexo 7.

Tabla 8.

Consumo de vapor en la planta con vapor en tachos a 25 psig

Config. N°	Calentadores			Tachos	Evaporador	Total %CL	ratio
	I	II	III				
1	3,00	4,41	6,17	13,94	17,80	45,32	4,19
2	2,96	4,41	6,17	13,94	20,10	44,62	3,71
3	2,92	4,41	6,17	13,94	19,36	43,89	3,85
4	2,86	4,41	6,17	13,94	17,80	42,33	4,19
5	2,96	4,35	6,17	13,94	23,49	43,60	3,17
6	2,92	4,35	6,17	13,94	22,75	42,86	3,28
7	2,86	4,35	6,17	13,94	21,19	41,30	3,52
8	2,92	4,29	6,17	13,94	21,65	41,76	3,44
9	2,86	4,29	6,17	13,94	20,09	40,21	3,71
10	2,86	4,20	6,17	13,94	17,80	37,92	4,19
11	2,96	4,35	6,10	13,94	28,23	42,17	2,64
12	2,92	4,35	6,10	13,94	27,49	41,43	2,71
13	2,86	4,35	6,10	13,94	25,93	39,87	2,87
14	2,92	4,29	6,10	13,94	26,39	40,33	2,82
15	2,86	4,29	6,10	13,94	24,83	38,77	3,00
16	2,86	4,20	6,10	13,94	22,54	36,48	3,31

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9.

Consumo de vapor en la planta con vapor en tachos a 14,75 psig

Config. N°	Calentadores			Tachos	Evaporador	Total %CL	ratio
	I	II	III				
17	3,00	4,41	6,17	13,76	28,51	42,09	2,61
18	2,96	4,41	6,17	13,76	30,81	41,39	2,42
19	2,92	4,41	6,17	13,76	30,07	40,65	2,48
20	2,86	4,41	6,17	13,76	28,51	39,09	2,61
21	2,96	4,35	6,17	13,76	34,20	40,37	2,18
22	2,92	4,35	6,17	13,76	33,45	39,63	2,23
23	2,86	4,35	6,17	13,76	31,89	38,07	2,34
24	2,92	4,29	6,17	13,76	32,36	38,53	2,30
25	2,86	4,29	6,17	13,76	30,80	36,97	2,42
26	2,86	4,20	6,17	13,76	28,51	34,68	2,61
27	2,96	4,35	6,10	13,76	38,94	38,94	1,91
28	2,92	4,35	6,10	13,76	38,19	38,19	1,95
29	2,86	4,35	6,10	13,76	36,63	36,63	2,03
30	2,92	4,29	6,10	13,76	37,10	37,10	2,01
31	2,86	4,29	6,10	13,76	35,54	35,54	2,10
32	2,86	4,20	6,10	13,76	33,25	33,25	2,24

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10.

Consumo de vapor en la planta con vapor en tachos a 4,97 psig

Config. N°	Calentadores			Tachos	Evaporador	Total %CL	ratio
	I	II	III				
33	3,00	4,41	6,17	13,55	25,05	38,63	2,98
34	2,96	4,41	6,17	13,55	27,35	37,93	2,73
35	2,92	4,41	6,17	13,55	26,60	37,19	2,80
36	2,86	4,41	6,17	13,55	25,05	35,63	2,98
37	2,96	4,35	6,17	13,55	30,74	36,91	2,43
38	2,92	4,35	6,17	13,55	29,99	36,16	2,49
39	2,86	4,35	6,17	13,55	28,43	34,61	2,62
40	2,92	4,29	6,17	13,55	28,90	35,07	2,58
41	2,86	4,29	6,17	13,55	27,34	33,51	2,73
42	2,86	4,20	6,17	13,55	25,05	31,22	2,98
43	2,96	4,35	6,10	13,55	35,48	35,48	2,10
44	2,92	4,35	6,10	13,55	34,73	34,73	2,15
45	2,86	4,35	6,10	13,55	33,17	33,17	2,25
46	2,92	4,29	6,10	13,55	33,64	33,64	2,22
47	2,86	4,29	6,10	13,55	32,08	32,08	2,32
48	2,86	4,20	6,10	13,55	29,79	29,79	2,50

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 11, se analiza el % de consumo de vapor respecto a la caña limpia de las diferentes configuraciones de funcionamiento se observan diferencias que van desde un 29,79 % a 45, 32%. Asimismo en la tabla 12 se analiza al ratio agua evaporada en los evaporadores respecto al consumo de vapor en el evaporador de cuádruple efecto arrojan valores desde 1,91 a 4,19.

Tabla 11.

Consumo de vapor a 25 psig ordenado en las diferentes configuraciones.

Config N°	Consumo de vapor %CL	Agua evaporada/Vapor evaporadores
48	29,79	2,50
42	31,22	2,98
47	32,08	2,32
45	33,17	2,25
32	33,25	2,24
41	33,51	2,73
46	33,64	2,22
39	34,61	2,62
26	34,68	2,61
44	34,73	2,15
40	35,07	2,58
43	35,48	2,10
31	35,54	2,10
36	35,63	2,98
38	36,16	2,49
16	36,48	3,31
29	36,63	2,03
37	36,91	2,43
25	36,97	2,42
30	37,10	2,01
35	37,19	2,80
10	37,92	4,19

Config N°	Consumo de vapor %CL	Agua evaporada/Vapor evaporadores
34	37,93	2,73
24	38,53	2,30
33	38,63	2,98
15	38,77	3,00
27	38,94	1,91
20	39,09	2,61
22	39,63	2,23
13	39,87	2,87
9	40,21	3,71
14	40,33	2,82
21	40,37	2,18
19	40,65	2,48
7	41,30	3,52
18	41,39	2,42
12	41,43	2,71
8	41,76	3,44
17	42,09	2,61
11	42,17	2,64
4	42,33	4,19
6	42,86	3,28
5	43,60	3,17
3	43,89	3,85
2	44,62	3,71
1	45,32	4,19

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12.

Ratio agua evaporada y vapor consumido evaporador cuádruple efecto ordenado en las diferentes configuraciones.

Config N°	Consumo de vapor %CL	Agua evaporada/Vapor evaporadores
1	45,32	4,19
4	42,33	4,19
10	37,92	4,19
3	43,89	3,85
2	44,62	3,71
9	40,21	3,71
7	41,30	3,52
8	41,76	3,44
16	36,48	3,31
6	42,86	3,28
5	43,60	3,17
15	38,77	3,00
33	38,63	2,98
36	35,63	2,98
42	31,22	2,98
13	39,87	2,87
14	40,33	2,82
35	37,19	2,80
41	33,51	2,73
34	37,93	2,73
12	41,43	2,71
11	42,17	2,64
39	34,61	2,62
17	42,09	2,61
20	39,09	2,61
26	34,68	2,61
40	35,07	2,58
48	29,79	2,50

Config N°	Consumo de vapor %CL	Agua evaporada/Vapor evaporadores
38	36,16	2,49
19	40,65	2,48
37	36,91	2,43
25	36,97	2,42
18	41,39	2,42
23	38,07	2,34
47	32,08	2,32
24	38,53	2,30
45	33,17	2,25
32	33,25	2,24
22	39,63	2,23
46	33,64	2,22
21	40,37	2,18
44	34,73	2,15
43	35,48	2,10
31	35,54	2,10
29	36,63	2,03
30	37,10	2,01
28	38,19	1,95
27	38,94	1,91

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13.

Análisis del consumo de vapor en la planta con vapor en tachos a 25, 14,75 y 4,97 psig

Evaluación	Config. N°	Parámetros	Calentadores			Tachos	Evaporador	total	ratio	figura N°
			I	II	III					
1	1	Presión (psig)	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	45,32	4,19	3
		Consumo %CL	3,00	4,41	6,17	13,94	17,80			
	17	Presión (psig)	25,00	25,00	25,00	14,75	25,00	42,09	2,61	4
		Consumo %CL	3,00	4,41	6,17	13,76	28,51			
	33	Presión (psig)	25,00	25,00	25,00	4,97	25,00	38,63	2,98	5
		Consumo %CL	3,00	4,41	6,17	13,55	25,05			
2	5	Presión (psig)	14,75	14,75	25,00	25,00	25,00	43,60	3,17	6
		Consumo %CL	2,96	4,35	6,17	13,94	23,49			
	21	Presión (psig)	14,75	14,75	25,00	14,75	25,00	40,37	2,18	7
		Consumo %CL	2,96	4,35	6,17	13,76	34,20			
	37	Presión (psig)	14,75	14,75	25,00	4,97	25,00	36,91	2,43	8
		Consumo %CL	2,96	4,35	6,17	13,55	30,74			
3	6	Presión (psig)	4,97	14,75	25,00	25,00	25,00	42,86	3,28	9
		Consumo %CL	2,92	4,35	6,17	13,94	22,75			
	22	Presión (psig)	4,97	14,75	25,00	14,75	25,00	39,63	2,23	10
		Consumo %CL	2,92	4,35	6,17	13,76	33,45			
	38	Presión (psig)	4,97	14,75	25,00	4,97	25,00	36,16	2,49	11
		Consumo %CL	2,92	4,35	6,17	13,55	29,99			

Evaluación	Config. N°	Parámetros	Calentadores			Tachos	Evaporador	total	ratio	figura N°
			I	II	III					
4	8	Presión (psig)	4,97	4,97	25,00	25,00	25,00			
		Consumo %CL	2,92	4,29	6,17	13,94	21,65	41,76	3,44	12
	24	Presión (psig)	4,97	4,97	25,00	14,75	25,00			
		Consumo %CL	2,92	4,29	6,17	13,76	32,36	38,53	2,30	13
	40	Presión (psig)	4,97	4,97	25,00	4,97	25,00			
		Consumo %CL	2,92	4,29	6,17	13,55	28,90	35,07	2,58	14
5	14	Presión (psig)	4,97	4,97	14,75	25,00	25,00			
		Consumo %CL	2,92	4,29	6,10	13,94	26,39	40,33	2,82	15
	30	Presión (psig)	4,97	4,97	14,75	14,75	25,00			
		Consumo %CL	2,92	4,29	6,10	13,76	37,10	37,10	2,01	16
	46	Presión (psig)	4,97	4,97	14,75	4,97	25,00			
		Consumo %CL	2,92	4,29	6,10	13,55	33,64	33,64	2,22	17
6	48	Presión (psig)	-3,88	-3,88	14,75	4,97	25,00			
		Consumo %CL	2,86	4,20	6,10	13,55	29,79	29,79	2,50	18

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 13 y 14 se analiza las principales configuraciones, son representadas en las figuras 4 y 5, donde se puede apreciar que el consumo de vapor se reduje en la planta si se utiliza vapores vegetales preferentemente de los últimos cuerpos del evaporador.

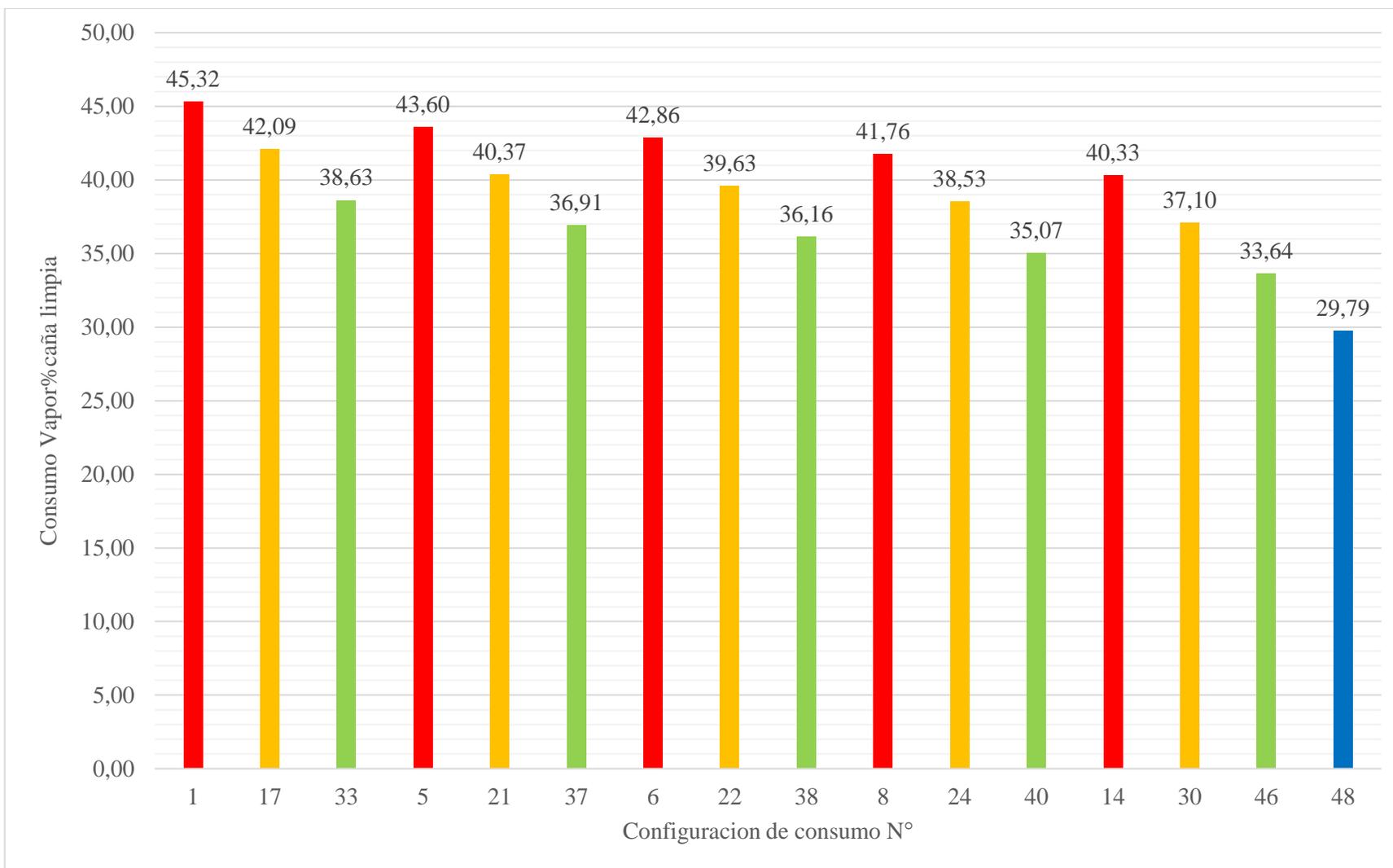


Figura 4. Variación consumo de vapor por cambios de presión de vapor a taches

Fuente: Elaboración propia

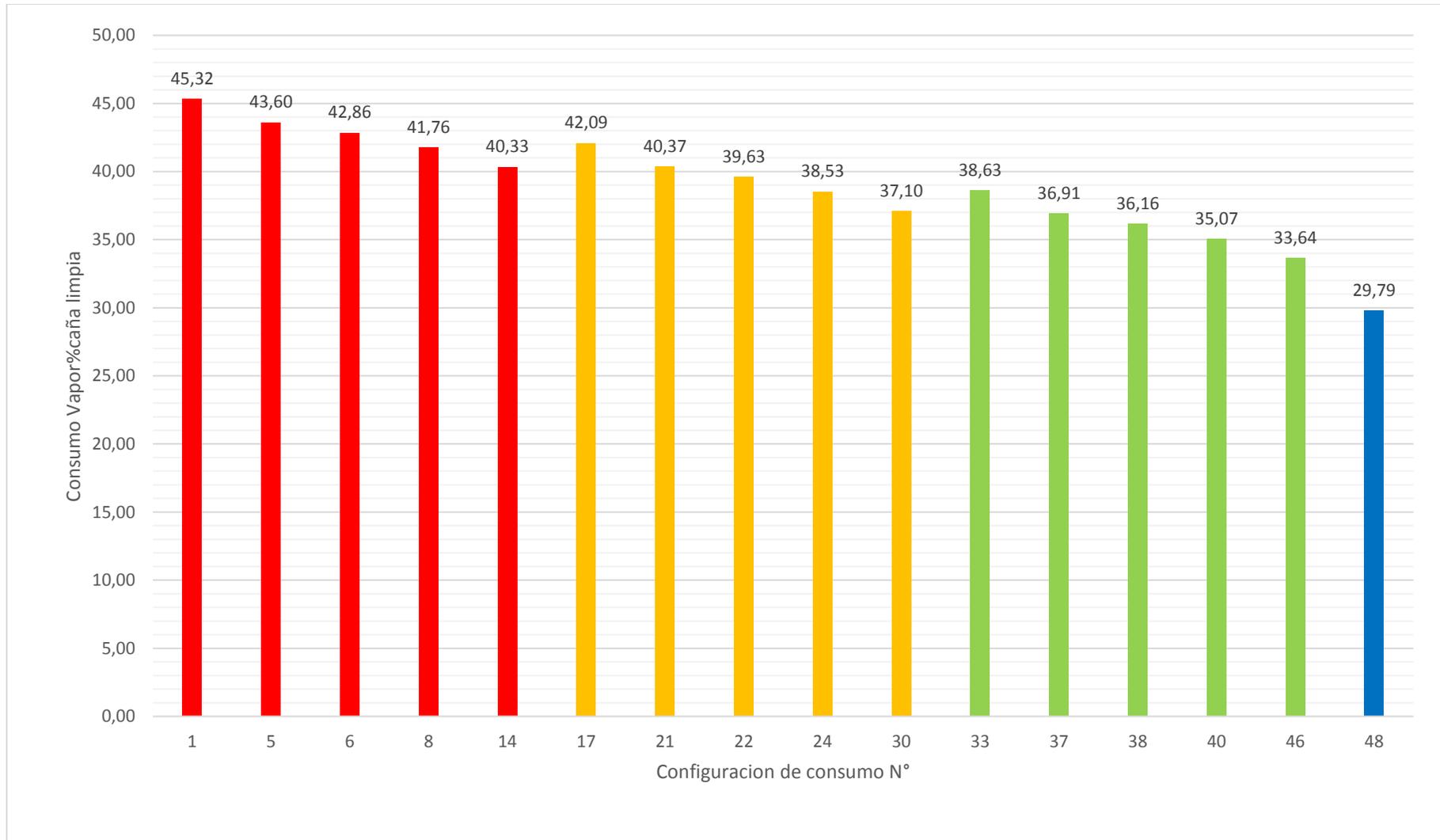


Figura 5. Variación consumo de vapor por cambios de presión en calentadores de jugo

Fuente: Elaboración propia

En resumen, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Para el análisis de consumo de vapor se consideró tres calentadores conectados en serie que incrementan la temperatura del jugo desde 28, 45, 70 y 105 °C, un sistema de cocimiento de tres templas A, B y C. presión de vapor de calefacción de 25 psig y un vacío de 25 pulg. de Hg para el cuarto evaporador y tachos, así como datos obtenidos de un balance de materiales.
- Las presiones de vapor saturado disponibles en el evaporador de cuádruple son: vapor calefacción (25 psig.), vapor vegetal del primer, segundo tercer y cuarto evaporador (14,75 psig, 4,97 psig, 7,22 pulg Hg y 25 pulg Hg respectivamente).
- Para las presiones disponibles (25 psig, 14,75 psig, 4,97 psig, 7,22 pulg Hg y 25 pulg Hg), el consumo de vapor en % de la caña limpia en el calentador I (3,00, 2,96, 2,92, 2,86, 2,75), en el calentador II (4,41, 4,35, 4,29, 4,20, 4,05), en el calentador III (6,17, 6,10, 6,00, 5,89, 5,86) y en tachos (13,94, 13,76, 13,55, 13,29, 12,79) respectivamente.
- Se selecciona 48 configuraciones viables técnicamente de funcionamiento de los evaporadores de cuádruple efecto con los calentadores I, II y II y tachos.
- El % de consumo de vapor respecto a la caña limpia varían desde un óptimo de 29,79 % a 45, 32% para las diferentes configuraciones de funcionamiento de los evaporadores de cuádruple efecto con los calentadores I, II y II y tachos.

CAPITULO V

DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Discusión

Respecto a Macías & Segovia (2017), Universidad de Guayaquil, Ecuador en su trabajo de investigación: *desarrollo de un simulador para el diseño y evaluación de evaporadores de simple efecto*, concluye asimismo la importancia de realizar las pruebas experimentales y de validación, determinándose que el simulador cumple con los objetivos propuestos.

Respecto a Matías (2015), Universidad de San Carlos de Guatemala en su tesis: *Evaluación de la eficiencia en una refinería de azúcar al implementar un sistema de evaporación de licor, Cengicaña*, llegando a concluir asimismo que es posible el ahorro de vapor vegetal, el cual permitirá un ahorro en bagazo.

Respecto a López (2016), Universidad Nacional de Colombia en su tesis: *evaluación técnica y económica de la implementación de un sistema de evaporación de múltiple efecto en los procesos productivos de la panela*, concluye que el consumo térmico de una planta con evaporación múltiple efecto es menor al consumo de otras tecnologías. A consecuencia del reúso del vapor vegetal dado.

Respecto a López (2014), Universidad de Córdoba, Argentina. En su tesis: *simulador de un evaporador de simple efecto, para concentrar jugos de frutas y leche*, Llega a concluir que se desarrolló un modelo matemático a partir de los balances de materia y energía, que combinados con relaciones matemáticas empíricas de las soluciones estudiadas, son adecuado para describir la dinámica del sistema de evaporación.

Respecto a Ayala (2013), Instituto Politécnico Nacional, México D.F., en su tesis: *diseño térmico de un intercambiador de calor de coraza y tubos*, llegando a concluir que existen diversos tipos de intercambiadores de calor, la elección de cualquiera de estos depende de la necesidad de que se tenga. Como es nuestro caso, las condiciones de presión de calefacción.

Respecto a Gómez (2014), Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, en su tesis: *modelamiento y simulación del sistema de evaporación de jugo clarificado para la etapa de ampliación de molienda de la Empresa Agroindustrial San Jacinto*, concluye de forma análoga la importancia del sangrado de vapor vegetal en los tres primeros efectos reduce el consumo de vapor de escape en un 11%. Asimismo el calentamiento previo del jugo claro a la temperatura de operación del primer efecto y las extracciones de vapor aumentan la economía global del vapor de escape en un 12%. Además, informa que el ingenio se hace más eficiente energéticamente al reducir su consumo de vapor de 0,44 a 0,39 Ton/ Ton de caña molida.

Respecto a Panana (2013), Universidad Nacional del Callao, Lima, en su tesis *Diseño de evaporadores de múltiple efecto, conectados en serie*, llegando a concluir que los kg de La evaporación de vapor de agua por kg de vapor de agua alimentado al sistema es de 2,06 kg, haciendo una autocrítica de que puede conducir a errores. Este ratio también se ha observado en este estudio del análisis de consumo de vapor.

Joaquín & Márquez (2004), Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, en su tesis: *análisis de los parámetros de operación mediante modelamiento y simulación, del sistema de evaporadores de la empresa Agroindustrial Laredo S.A.A.*, facilita los parámetros de operación del cuádruple efecto en el estudio, afirmando que el aumento en el flujo de alimentación de jugo claro con una concentración (Brix) de entrada constante, conlleva a la

obtención de una menor concentración de jugo evaporado en cada efecto, a excepción del último efecto, debido a que es la concentración final fijada, la que se desea obtener.

Respecto a Heras (2004), Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, en su tesis: *análisis de los parámetros de operación mediante modelamiento y simulación, del sistema de evaporadores de la empresa Agroindustrial Laredo S.A.A.*, concluye asimismo que un sistema de operación de 5 efectos con alimentación hacia adelante tiene un ahorro en vapor de proceso del orden del 206% en relación al vapor vegetal evaporado, comparado al de simple efecto.

Respecto a Alcalde (2017), Universidad Nacional de Trujillo, en su tesis: *optimización del consumo de vapor mediante la instalación de calentadores de jugo de caña clarificado en un ingenio azucarero*, llegando la conclusión que el consumo de vapor de escape de 20 psig en el sistema de evaporación sin la implementación de los calentadores de jugo clarificado es de 132 Ton/h. El consumo de vapor de escape de 20 psig en el sistema de evaporación con la implementación de los calentadores de jugo clarificado es de 120Ton/h.

Respecto a Garro (2019), Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Perú, en su tesis: *desarrollo de un simulador con Microsoft Excel para el diseño y evaluación de evaporadores de múltiple efecto en la industria azucarera*, de forma similar llega a concluir que desarrollo tablas que funcionan adecuadamente en el simulador, identifico los datos operacionales de entrada, salida del simulador y datos técnicos de cada evaporador, tanque flash y el sistema de evaporador de múltiple efecto. Asimismo el simulador permite la evaluación de parámetros de eficiencias de los evaporadores de múltiple efecto de manera adecuada.

5.2 Conclusiones

- Se delimitó la cantidad de calentadores y el sistema de cocimiento en los tachos con las condiciones operativas para el análisis de consumo de vapor a diferentes configuraciones de funcionamiento del evaporador de cuádruple efecto en la industria azucarera.
- Se determinan las presiones de vapor saturado disponibles en el evaporador de cuádruple con sus respectivas propiedades termodinámicas para el análisis de consumo de vapor a diferentes configuraciones de funcionamiento del evaporador de cuádruple efecto en la industria azucarera.
- El consumo de vapor en % de la caña limpia en el calentador I, calentador II, en el calentador III y en los tachos disminuyen a medida que se disminuye la presión del vapor de calefacción.
- Para la identificación de las configuraciones de funcionamiento de los evaporadores de cuádruple efecto con los calentadores I, II y II y tachos. Se tuvo en cuenta que la temperatura del vapor de calefacción sea superior a la del material a calentar y/o concentrar.
- El consumo de vapor respecto a la caña limpia es menor en las configuraciones donde utilizan en su mayor parte vapor vegetal del tercer evaporador, seguidamente del segundo y del primer evaporador del cuádruple efecto.

5.3 Recomendaciones

- De acuerdo a la delimitación dada en el análisis, se recomienda ampliar el análisis considerando otras variables como calentadores de jugo clarificado.
- Utilizar el procedimiento para evaluar situaciones particulares de operación y disposición de equipos que cada ingenio azucarero presenta, con el objeto de buscar y reducir el consumo de vapor.

- El análisis se realizó con datos obtenidos a través de la distribución de las presiones del cuádruple efecto, se sugiere también utilizar las presiones reales de trabajo de las sangrías de vapor del cuádruple efecto. Considerar que al aumentar o disminuir el consumo de vapor en cada cuerpo, ésta cambia de presión por la superficie de calefacción que presenta la calandria del evaporador.
- Los consumos de vapor en los calentadores a diferentes presiones muestran una disminución a medida que se disminuye la presión del vapor de calefacción. Adicionalmente al análisis del consumo debe considerarse el área de calefacción necesaria para el calentamiento, por lo que se sugiere complementar el estudio con el cálculo adicional de la superficie de calefacción necesaria de acuerdo a la presión de calefacción.

CAPITULO VI

FUENTES DE INFORMACIÓN

6.1 Fuentes documentales

- Alcalde, A. (2017). *Optimización del consumo de vapor mediante la instalación de calentadores de jugo de caña clarificado en un ingenio azucarero*. Recuperado el 05 de octubre de 2018, de <http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/9485/ALCALDE%20SILVA%2c%20Anghelo%20Renzo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ayala, J. (2013). *Diseño térmico de un intercambiador de calor de coraza y tubos*. Tesis de grado, Instituto Politécnico Nacional, México D.F. Recuperado el 21 de Octubre de 2018, de <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/12663/AYALA%20LUNA%20JESSICA%20LILIANA.pdf?sequence=1>
- Caceres, J. (2015). *Uso eficiente del agua y su influencia en el vertimiento de efluentes líquidos, empresa N.S. Guadalupe S.A.C., 2015*. Universidad Nacional José Fasutino Sánchez Carrión, Lima, Huacho.
- Garro, S. (2019). *Desarrollo de un simulador con microsoft excel para el diseño y evaluación de evaporadores de múltiple efecto en la industria azucarera*. Tesis de grado, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Lima, Huacho.
- Gómez, E. (2014). *Modelamiento y simulación del sistema de evaporación de jugo clarificado par el etapa de ampliación de molienda de la empresa agroindustrial San Jacinto*. Tesis de grado, Universidad Nacional de Trujillo, La Libertad, Trujillo. Recuperado el 12 de octubre de 2018, de http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/3567/GomezCabanillas_E.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Heras, L. (2004). *Performance óptima de evaporadores de múltiple efecto para la concentración de jugo de caña en función del tipo de alimentación y ciclo de trabajo*. Tesis de grado, Universidad Nacional de Trujillo, La Libertad. Recuperado el 25 de noviembre de 2018, de <http://cip-trujillo.org/ovcipcddl/uploads/biblioteca/abstract/T006487.pdf>
- Joaquin, E., & Marquez, V. (2004). *Análisis de los parámetros de operación mediante modelamiento y simulación, del sistema de evaporadores de la Empresa Agroindustrial Laredo S.A.A.* Tesis de grado, Universidad de Trujillo, Trujillo. Recuperado el 11 de octubre de 2018, de http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/9125/JoaquinOruna_E%20-%20MarquezMathey_V.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- López, E. (2014). *Simulador de un evaporador de simple efecto, para concentrar jugos de frutas y leche*. Tesis de Grado, Universidad de Córdova, Córdova. Recuperado el 01 de agosto de 2018, de https://www.unicordoba.edu.co/oldfiles/14_SIMULADOR%20DE%20UN%20EVAPORADOR%20DE%20SIMPLE%20EFECTO,%20PARA%20CONCENTRAR%20JUGOS%20DE%20FRUTAS%20Y%20LECHE.pdf
- López, R. (2016). *Evaluación técnica y económica de la implementación de un sistema de evaporación de múltiple efecto en los procesos productivos de la panela*. Recuperado el 2018
- Macias, G., & Segovia, I. (2017). *Desarrollo de un simulador para el diseño y evaluación de evaporadores de simple efecto*. Tesis de grado, Universidad de Guayaquil, Guayaquil. Recuperado el 12 de octubre de 2018, de <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/18250/1/401-1229%20-%20Desarrollo%20de%20un%20simulador%20para%20el%20dise%C3%B1o%20y%20eval.pdf>
- Matías, M. (2015). *Evaluación de la eficiencia en una refinería de azúcar al implementar un sistema de evaporación de licor, Cengicaña*. Tesis de grado, Universidad de San Carlos de Guatemala. Recuperado el 25 de noviembre de 2018, de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/1262/>

Panana, A. (2013). *Diseño de evaporadores de múltiple efecto, concentrados en serie*. Tesis de grado, Universidad Nacional del Callao, Lima. Recuperado el 12 de octubre de 2018, de http://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/UNAC/2027/Panana_Informefinal_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y

6.2 Fuentes bibliográficas

Carrasco, S. (2017). *Metodología de la Investigación Científica* (2 ed.). Lima, Perú: San Marcos E.I.R.L.

Chen, J. (1997). *Manual de azúcar de caña*. Mexico: Limusa noriega Editores.

Hugot, E. (1984). *Manual para ingenieros azucareros*. Mexico: CIA Editorial Continental S.A.

Sabino, C. (1992). *El proceso de la investigación*. Caracas, Venezuela: Panapo.

6.3 Fuentes hemerográficas

Armstrong. (2002). *Guía para la conservación de vapor en el drenado de condensados*. Recuperado el 06 de Diciembre de 2012, de <http://www.armstronginternational.com/files/products/traps/pdf/n101spanish.pdf>

Carrizales, R. (2010). Cálculo de evaporadores de múltiple efecto, un método simplificado. *Revista académica de investigación Tlatemoani*(2).

Suaréz, R., & Díaz, A. (2011). Modelación matemática del área de calentadores de un central azucarero para la producción de azúcar crudo. *Tecnología Química*, 31(3), 352-368.

6.4 Fuentes electrónicas

Chacón, A. (10 de Noviembre de 2017). *Encalado de jugo de la caña (alcalinización)*. Recuperado el 02 de agosto de 2018, de scribd.com: <https://es.scribd.com/document/363171966/Encalado-de-Jugo>

IFAI. (s.f.). *Operaciones de evaporadores*. Recuperado el 12 de Agosto de 2018, de Aula virtual FCEQyN: <http://www.aulavirtual-exactas.dyndns.org/claroline/backends/download.php?url=L0NyaXN0YWxpemFjaFnuL1Zpc2l0YV9JbmdlbmlvL1Byb2NIZGltaWVudG9fZXZhcG9yYWRvcmlvLnBkZg%3D%3D&cidReset=true&cidReq=OPTRCA>

Ledesma, R. (Mayo de 2014). *Las Técnicas de la Investigación*. Recuperado el 13 de Abri de 2018, de Monografias.com: <http://www.monografias.com/trabajos101/tecnicas-investigacion/tecnicas-investigacion2.shtml#top>

medidordeph.com. (15 de setiembre de 2014). *El azúcar y los grados brix*. Recuperado el 05 de Agosto de 2018, de <https://medidordeph.com/blog/2014/09/el-azucar-y-los-grados-brix/>

Pérez, J., & Gardey, A. (2010). *Definición.pe*. Recuperado el 12 de Agosto de 2018, de Definición de vapor: <https://definicion.de/vapor/>

TLV Compañía especialista de vapor. (s.f.). *Introduccion a la recuperacion de condensado*. Recuperado el 13 de agosto de 2018, de <http://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/introduction-to-condensate-recovery.html>

Wikipedia. (2011). *Azucarera*. Recuperado el 10 de Agosto de 2018, de https://es.wikipedia.org/wiki/Azucarera#Planta_azucarera

Wikipedia. (2014). *Configuración*. Recuperado el 15 de Diciembre de 2018, de [https://es.wikipedia.org/wiki/Configuraci%C3%B3n_\(inform%C3%A1tica\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Configuraci%C3%B3n_(inform%C3%A1tica))



Anexo 1: Matriz de consistencia

ANÁLISIS DEL CONSUMO DE VAPOR A DIFERENTES CONFIGURACIONES DE FUNCIONAMIENTO DE LOS EVAPORADORES DE CUÁDRUPLE EFECTO EN LA INDUSTRIA AZUCARERA

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES			MÉTODOS Y TÉCNICAS
				DIMENSIÓN	INDICADOR	ESCALA	
<p>PROBLEMA GENERAL</p> <ul style="list-style-type: none"> ¿Qué permite el análisis del consumo de vapor a diferentes configuraciones de funcionamiento de los evaporadores de cuádruple efecto en la industria azucarera? 	<p>OBJETIVO GENERAL</p> <ul style="list-style-type: none"> Realizar el análisis del consumo de vapor a diferentes configuraciones de funcionamiento de los evaporadores de cuádruple efecto en la industria azucarera. 	<p>HIPÓTESIS GENERAL</p> <ul style="list-style-type: none"> El análisis del consumo de vapor a diferentes configuraciones de funcionamiento de los evaporadores de cuádruple efecto permite identificar la configuración de funcionamiento más eficiente en la industria azucarera. 	<p>VARIABLE INDEPENDIENTE</p> <p>3. Configuraciones de funcionamiento de los evaporadores de cuádruple efecto</p>	<p>CONDICIONES OPERATIVAS Y CONFIGURACIÓN DE EQUIPOS.</p> <ul style="list-style-type: none"> Presiones de vapor saturado disponibles Consumo de vapor en los calentadores y tachos Configuraciones de funcionamiento Consumo de vapor de Análisis del consumo de vapor 	<p>INDICADOR</p> <ul style="list-style-type: none"> Evaporador cuádruple efecto Presión de vapor calefacción primer evaporador Presión de vacío cuarto evaporador Brix del Jugo clarificado Brix del Jarabe Numero de calentadores de jugo encalado Temperatura del jugo entrada al calentador I Temperatura del jugo salida del calentador I Temperatura del jugo salida del calentador II Temperatura del jugo salida del calentador III Sistema de tres temple tachos Ratio de consumo de vapor en los tachos Presión de vapor calefacción primer evaporador Presión del primer evaporador Presión del segundo evaporador Presión del tercer evaporador Presión de vacío cuarto Vapor calentador I Vapor calentador II Vapor calentador o III Vapor tachos A, B y C Identificación de las configuraciones viables técnicamente Consumo de vapor en las viables técnicamente Análisis del consumo de vapor en las viables técnicamente 	<p>ESCALA</p> <ul style="list-style-type: none"> Nominal Razón Razón Razón Razón Razón Razón Razón Razón Nominal Razón Razón Razón Razón Razón Razón Razón Razón Nominal Razón Nominal 	<p>TIPO DE INVESTIGACIÓN</p> <ul style="list-style-type: none"> Descriptivo explicativo Aplicativa o tecnológica <p>POBLACIÓN Y MUESTRA</p> <ul style="list-style-type: none"> Población Flujos de vapor en los evaporadores de cuádruple efecto, calentadores y tachos en la industria azucarera. Muestra. Flujos de vapor en los evaporadores de cuádruple efecto, calentadores y tachos en la industria azucarera. <p>PROCEDIMIENTO</p> <ul style="list-style-type: none"> Elección de las condiciones operativas y configuración de equipos. Identificación de las presiones de vapor disponible Cálculo del consumo de vapor en los equipos a presión disponible. Identificación de las configuraciones técnicas viables Cálculo del consumo de vapor de las configuraciones. Análisis del consumo de vapor en las configuraciones <p>TÉCNICAS</p> <ul style="list-style-type: none"> Observación Documental <p>INSTRUMENTOS</p> <ul style="list-style-type: none"> Ficha de observación Análisis de contenido: libros, conferencias, normas.

Fuente: elaboración propia

Anexo 2. Balance de materiales sistema de tres templas – tachos y centrifugas

Cáceres (2015) en su tesis: *uso eficiente del agua y su influencia en el vertimiento de efluentes líquidos, empresa N.S. Guadalupe S.A.C., 2015*, muestra los cálculos para la obtención de parámetros de producción en la estación de cocimiento y centrifuga. Se adapta a los análisis y parámetros considerados en el estudio:

1. Análisis de laboratorio

Material	Brix	Pol	Pureza	Humedad
Jarabe	65	55,10	84,77	
Masa "A"	93,30	79,20	84,89	
Miel "A"	84,00	53,50	63,69	
Masa "B"	95,00	68,00	71,58	
Miel "B"	85,00	44,80	52,71	
Masa "C"	98,30	59,00	60,02	
Melaza	86,00	31,20	36,28	
Azúcar "A"	99,75	98,60	98,85	0,25
Azúcar "B"	99,70	97,20	97,49	0,30
Grano	98,50	64,10	65,08	
Azúcar 3ra	96,40	83,00	86,10	3,60
Semilla	94,00	80,93	86,10	6,00
% de semilla a la masa a			60,00	%

2. *Requerimiento de materiales para el grano*

Pureza del pie de grano		75,00	%	
Pie de grano	75,00	12,37		55,49
		65,08		
Miel B	52,71	9,92		44,51
		22,29		
<i>Grano</i>				
Toneladas de grano a formar		15,000	TM grano	
Toneladas de sólidos en el grano		14,775	TM de Sólidos	
Toneladas de pol en el grano		9,615	TM de Pol	
<i>Miel B al grano</i>				
Toneladas de Sólidos de Miel B al grano		6,577	TM Sólidos	
Toneladas de Pol de Miel B al grano		3,466	TM Pol	
Toneladas de miel B		7,737	TM miel B	
<i>Pie de grano</i>				
Toneladas de Sólidos al grano		8,198	TM Sólidos	
Toneladas de Pol al grano		6,149	TM Pol	
Toneladas de pie de grano		8,198	TM pie 75 Pza.	

3. *Requerimiento de materiales para el pie de grano*

Jarabe	84,77	11,31		53,65
		75,00		
Miel A	63,69	9,77		46,35
		21,08		

Jarabe requerido

Toneladas de sólidos del Jarabe	4,399	TM Sólidos
Toneladas de Pol del jarabe	3,729	TM Pol
Toneladas de jarabe requerido	6,767	TM Jarabe

Miel "A" requerido

Toneladas de sólidos de miel A	3,800	TM Sólidos
Toneladas de pol de miel A	2,420	TM Pol
Toneladas de Miel A requerido	4,523	TM Miel A

4. Balance de materiales masa C

a) Requerimiento de materiales para la masa c

pureza final de la masa C		60,02	%
Pie de grano	65,08	7,31	59,13
		60,02	
Miel B	52,71	5,06	40,87
		12,37	

Pie de grano a la masa C

Toneladas de Sólidos al grano	14,775	TM Sólidos
Toneladas de Pol al grano	9,615	TM Pol
Toneladas de grano	15,000	TM

Masa C

Toneladas de masa C a formar	25,420	TM masa C
Toneladas de sólidos en la masa C	24,988	TM de Sólidos
Toneladas de pol en la masa C	14,998	TM de Pol

Miel B a la masa C

Toneladas de Sólidos de Miel B a la masa C 10,213 TM Sólidos

Toneladas de Pol de Miel B a la masa C 5,383 TM Pol

Toneladas de miel B 12,015 TM miel B

b) Azúcar C y melaza producida

Material	Brix	Pol	Pureza	Humedad
Masa "C"	98,30	59,00	60,02	0
Azúcar "C"	96,40	83,00	86,10	3,6
Melaza	86,00	31,20	36,28	0
Azúcar C	86,10		23,74	47,65

Melaza		60,02		
Melaza	36,28		26,08	52,35
Melaza			49,82	

Masa C

Toneladas de masa C a formar 25,420 TM masa C

Toneladas de sólidos en la masa C 24,988 TM de Sólidos

Toneladas de pol en la masa C 14,998 TM de Pol

Azúcar C producida

Toneladas de sólidos al azúcar C 11,907 TM de Sólidos

Toneladas de pol al azúcar C 10,252 TM de Pol

Toneladas de azúcar C producida 12,352 TM Azúcar C

Melaza producida

Toneladas de sólidos a la melaza 13,080 TM de Sólidos

Toneladas de pol a la melaza 4,745 TM de Pol

Toneladas de melaza producida 15,209 TM de Melaza

5. Balance de materiales masa B

a) Azúcar B Y Miel B producida

Material	Brix	Pol	Pureza	Humedad
Masa "B"	95,00	68,00	71,58	
Azúcar "B"	99,70	97,20	97,49	0,30
Miel "B"	85,00	44,80	52,71	
<hr/>				
Azúcar B	97,49		18,87	42,14
		71,58		
Miel B	52,71		25,91	57,86
			44,787	
<i>Miel B producida</i>				
Toneladas de sólidos de miel B			16,789	TM de Sólidos
Toneladas de pol de miel B			8,849	TM de Pol
Toneladas de miel B			19,752	TM de miel B
<i>Masa B</i>				
Toneladas de masa B a formar			30,545	TM masa B
Toneladas de sólidos en la masa B			29,017	TM de Sólidos
Toneladas de pol en la masa B			20,770	TM de Pol
<i>Azúcar B producida</i>				
Toneladas de sólidos en azúcar miel B			12,228	TM de Sólidos
Toneladas de pol en azúcar B			11,921	TM de Pol
Toneladas de azúcar B			12,265	TM de Azúcar B

b) *Requerimiento de materiales para la masa B*

Material	Brix	Pol	Pureza	Humedad
Masa b	95,00	68,00	71,58	
Jarabe	65,00	55,10	84,77	
Azúcar C	96,40	83,00	86,10	3,60
Miel A	84,00	53,50	63,69	
			40,000	%
<i>% de semilla a la masa B</i>				
<i>Pie de semilla a masa B</i>				
Toneladas de Sólidos pie de masa B			4,763	TM Sólidos
Toneladas de pol pie de masa B			4,101	TM Pol
Toneladas de azúcar C consumida			4,941	Tm de semilla
<i>Masa B</i>				
Toneladas de masa B			30,545	TM masa B
Toneladas de sólidos en la masa B			29,017	TM de Sólidos
pureza esperada de la masa B			71,58	%
Toneladas de pol en la masa B			20,770	TM de Pol
<i>Mezcla de jarabe y miel A</i>				
Toneladas de sólidos en jarabe y miel A			24,254	TM de Sólidos
Toneladas de Pol en jarabe y miel A			16,669	TM de Pol
Pureza de la mezcla aparente			68,73	%
pureza final de la masa B			71,58	%

Jarabe	84,77	5,04	23,90
		68,73	
Miel A	63,69	16,04	76,10
		21,08	

Miel "A" a la masa B

Toneladas de Sólidos de Miel A a la masa B	18,459	TM Sólidos
Toneladas de Pol de Miel A a la masa B	11,756	TM Pol
Toneladas de miel A	21,974	TM miel A

Jarabe a la masa B

Toneladas de Sólidos de jarabe a la masa B	5,796	TM Sólidos
Toneladas de Pol de jarabe a la masa B	4,913	TM Pol
Toneladas de jarabe	8,917	TM jarabe

6. Balance de materiales masa A

a) Azúcar A y miel A producida

Material	Brix	Pol	Pureza	Humedad
Masa "A"	93,30	79,20	84,89	
Azúcar "A"	99,75	98,60	98,85	0,25
Miel "A"	84,00	53,50	63,69	
Azúcar "A"	98,85		21,20	60,29
		84,89		
Miel "A"	63,69		13,96	39,71
			35,16	

Miel A producida

Toneladas de sólidos miel A a la masa C	3,800	TM de Sólidos
Toneladas de sólidos miel A a la masa B	18,459	TM de Sólidos
Toneladas de sólidos de miel A	22,258	TM de Sólidos
Toneladas de pol de miel A	14,176	TM de Pol
Toneladas de miel A	26,498	TM de miel A

Masa A

Toneladas de masa A a formar	60,081	TM masa A
Toneladas de sólidos en la masa A	56,056	TM de Sólidos
Toneladas de pol en la masa A	47,584	TM de Pol

Azúcar A producida

Toneladas de sólidos en azúcar A	33,798	TM de Sólidos
Toneladas de pol en azúcar A	33,408	TM de Pol
Toneladas de azúcar A	33,882	TM de Azúcar A

b) Requerimiento de materiales para la masa A

Material	Brix	Pol	Pureza	Humedad
Masa A	93,30	79,20	84,89	
Jarabe	65,00	55,10	84,77	
Semilla	96,40	83,00	86,10	3,60

% De semilla a la masa A	60,00	%
--------------------------	-------	---

Pie de semilla a masa A

Toneladas de Sólidos pie de masa A	7,144	TM Sólidos
Toneladas de pol pie de masa A	6,151	TM Pol
Toneladas de azúcar C consumida	7,411	TM de semilla

Masa A

Toneladas de masa A	60,081	TM masa A
Toneladas de sólidos en la masa A	56,06	TM de Sólidos
Toneladas de pol en la masa A	47,5843	TM de Pol
Jarabe a la masa A		
Toneladas de Sólidos de Jarabe a la masa A	48,911	TM Sólidos
Toneladas de Pol de jarabe a la masa A	41,433	TM Pol
Toneladas de jarabe	75,248	TM Jarabe

Parámetros de operación obtenidos

$AE_{\text{tachoA}}\%J$: % de agua evaporada en tacho A respecto al jarabe = 24,83 %

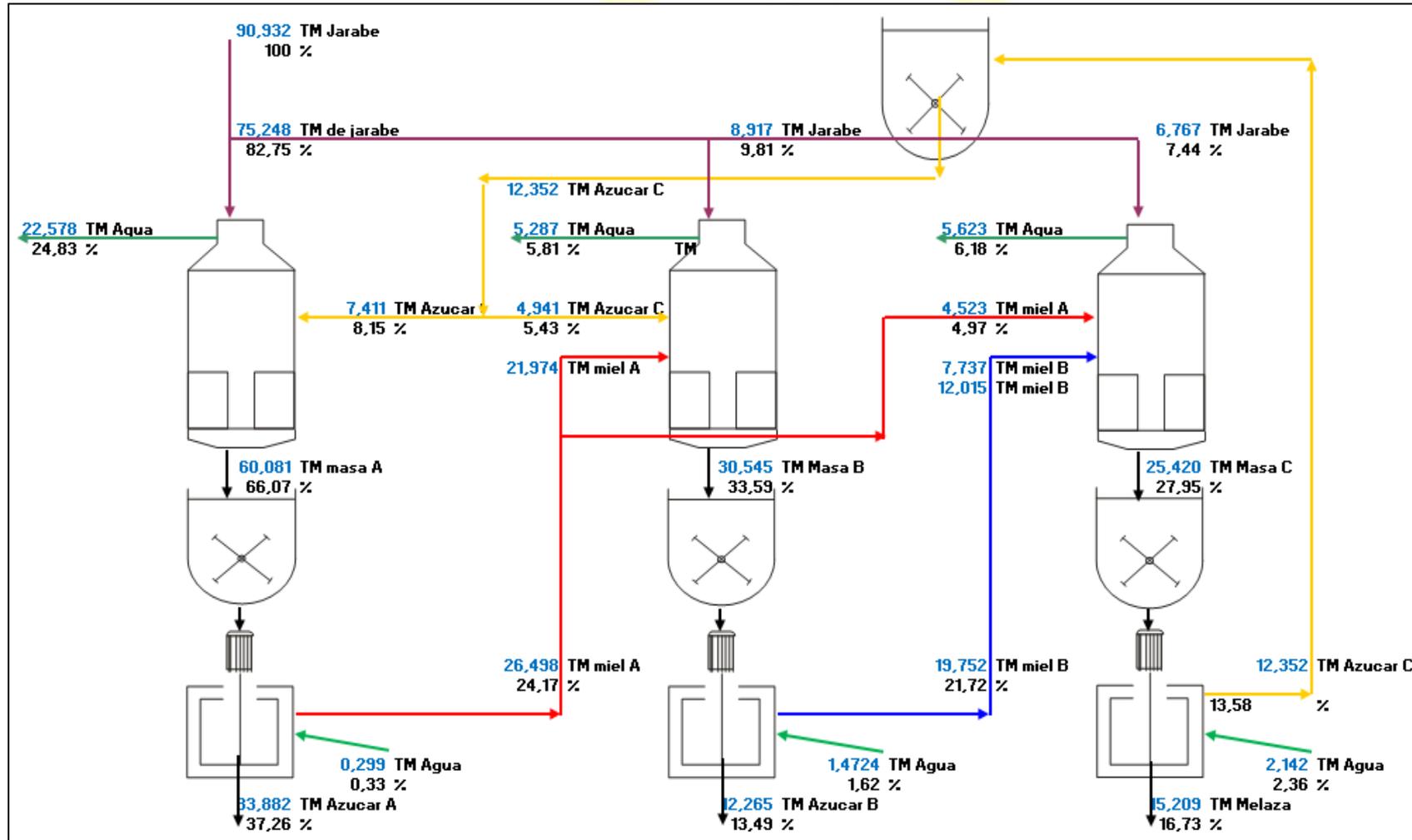
$AE_{\text{tachoB}}\%J$: % de agua evaporada en tacho B respecto al jarabe = 5,81 %

$AE_{\text{tachoC}}\%J$: % de agua evaporada en tacho C respecto al jarabe = 6,18 %

$AE_{\text{tachos}}\%J$: % de agua evaporada en tachos respecto al jarabe = 36,83 %

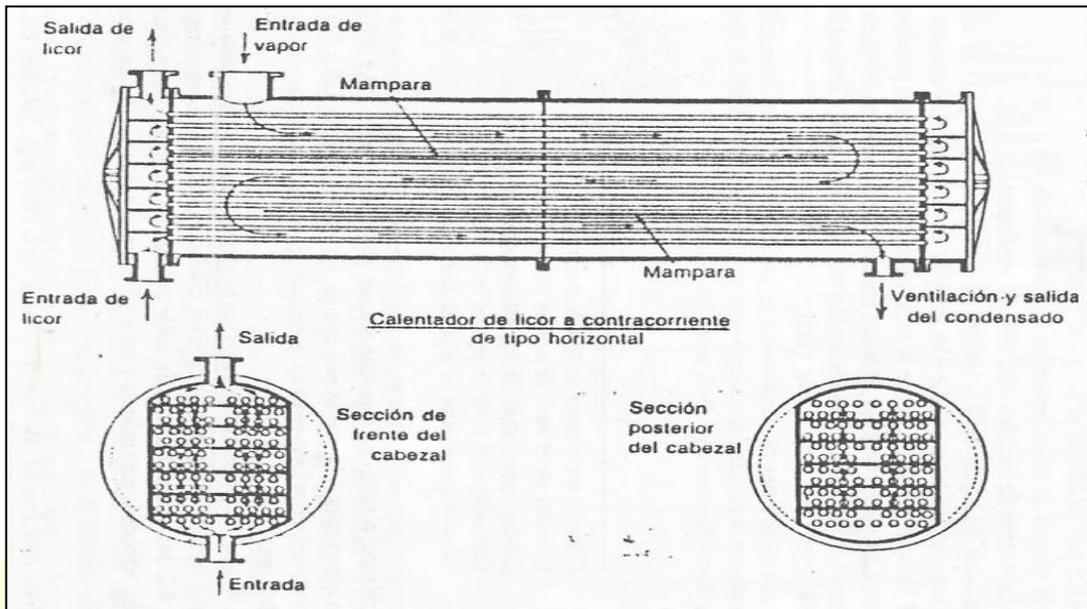
Fuente: (Caceres, 2015, pág. 108 al 113)

Anexo 3. Balance de materia en tachos y centrifugas A, B y C



Fuente: (Caceres, 2015, pág. 59)

Anexo 4. Procedimiento de cálculo del consumo de vapor en los calentadores de jugo



Fuente: (Chen, 1991, pág. 243)

Vapor de calefacción:

Presión : P
 Entalpía evaporación : H_{lv}
 Eficiencia de transmisión : E_f

Jugo clarificado:

Jugo % Caña : $J\%CL$
 Brix del Jugo : $BrixJ$
 Calor específico : $1 - 0,0056 BrixJ$
 Temperatura Entrada Jugo : T_e
 Temperatura de salida Jugo : T_s

Vapor consumido:

$$\text{Vapor consumido} = \frac{(J\%CL) (1-0,0056 Brix)(T_s-T_e)}{H_{lv} \cdot E_f}$$

Anexo 5. Procedimiento de cálculo del consumo de vapor en los tachos

Vapor de calefacción:

- Presión de vapor : Pi
- Entalpía evaporación : $H_{LV_{vp \text{ calef a Pi}}}$
- Vapor consumo./Agua Evapo: $F_c = 1,5$
- Eficiencia de transmisión : $E_{fic} = 95 \%$

Agua Evaporada

- Vacío de trabajo en tachos : 25 Pulg Hg
- Entalpía Evaporación : $H_{LV_{tachos}} = 566,8 \text{ Kcal/Kg}$

Consumo de vapor:

- Agua Evaporada Tachos % Jarabe : 36,83 %
- J % CL : 22 %
- $AE_{tachos \% J}$: 36,83 %
- $AE_{tachos \% CL}$: $(AE_{tachos \% J}) (J \% CL)$
- $AE_{tachos \% CL}$: 8,10 %
- Vapor consumido =
$$\frac{(AE_{tachos \% CL}) (H_{LV_{tachos}})}{(H_{LV_{vp \text{ calef}}}) (E_{fic})} \times \text{Factor}$$

J % CL : % de jarabe respecto a la caña limpia

$AE_{tachos \% CL}$: % agua evaporada en tachos respecto a la caña limpia

$H_{LV_{tachos}}$: Entalpía de evaporación vapor vegetal en tachos

$H_{LV_{vp \text{ calef}}}$: Entalpía de evaporación vapor de calefacción a tachos

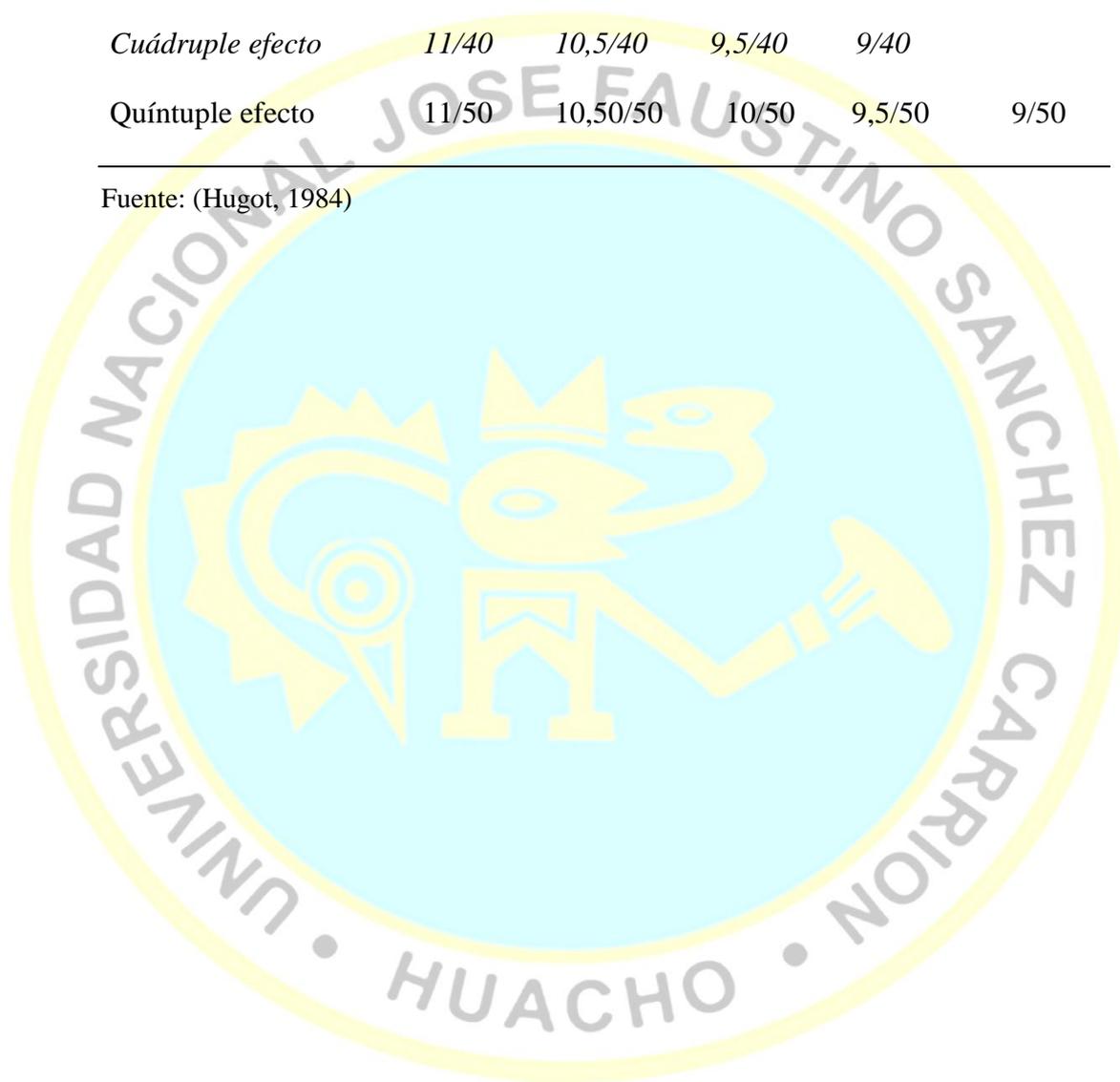
E_{fic} : Eficiencia de transferencia de calor

F_c : 1, 5 (Spencer considera de 1,2 a 1,5, Hugot considera 1,5 y Chen 1,35)

Anexo 6. Distribución de la presión en evaporadores de múltiple efecto

	1 C	2 C	3 C	4 C	5 C
Triple efecto	11/30	10/30	9/30		
<i>Cuádruple efecto</i>	<i>11/40</i>	<i>10,5/40</i>	<i>9,5/40</i>	<i>9/40</i>	
Quíntuple efecto	11/50	10,50/50	10/50	9,5/50	9/50

Fuente: (Hugot, 1984)



Anexo 7. Ecuaciones de balance de materia y energía en los evaporadores

Nomenclatura:

Je	: Jugo clarificado	HLci	: Entalpia líquida del condensado salida del evaporador i
Ji	: Jugo salida del i evaporador	Pi	: Toma de vapor vegetal del evaporador i
Be	: Brix del jugo clarificado	%Perd _i	: Perdida de energía en el evaporador i
Bi	: Brix del Jugo salida del i evaporador	Ce _i	: Calor especifico jugo salida evaporador i
Te	: Temperatura del jugo clarificado	k	: Coeficiente del calor especifico = 0,0056
Ti	: Temperatura del Jugo salida del I evaporador	fi	: Factor de pérdida de energía en el evaporador i
Vo	: Vapor vivo de calefacción	%Perd ₂	:Perdida de energía en el evaporador 2
Vi	: Vapor vegetal al evaporador i	Ri	: Fracción de reevaporizado del tanque flash i
qi	: Contenido de energía respecto a la Tref.	fRi	: Factor de uso de reevaporizado tanque flash i (0: no, 1: si)
EVi	: Energía del vapor evaporador i		
HVo	: Entalpia del vapor del vapor de calefacción		
HVi	: Entalpia del vapor vegetal del evaporador i		
Tci	: Temperatura del condensado salida del evaporador i		

Ecuaciones de balance de materia y energía en los evaporadores

Cuerpo	Evaporador 1	Evaporador 2	Evaporador 3	Evaporador 4
Jugo	$J_e = J_1 + P_1 + V_1$	$J_1 = J_2 + P_2 + V_2$	$J_2 = J_3 + P_3 + V_3$	$J_3 = J_4 + P_4 + V_4$
	$J_e \cdot B_e = J_1 \cdot B_1$	$J_1 \cdot B_1 = J_2 \cdot B_2$	$J_2 \cdot B_2 = J_3 \cdot B_3$	$J_3 \cdot B_3 = J_4 \cdot B_4$
Energía del jugo	$q_1 = m \cdot C_{e1} \cdot (T_1 - T_{ref})$	$q_2 = m \cdot C_{e2} \cdot (T_2 - T_{ref})$	$q_3 = m \cdot C_{e3} \cdot (T_3 - T_{ref})$	$q_4 = m \cdot C_{e4} \cdot (T_4 - T_{ref})$
(q)	$C_{e1} = 1 - 0,0056 \cdot B_1$	$C_{e2} = 1 - 0,0056 \cdot B_2$	$C_{e3} = 1 - 0,0056 \cdot B_3$	$C_{e4} = 1 - 0,0056 \cdot B_4$
Energía del Vapor	$EV_1 = V_1 \cdot HV_1$	$EV_2 = V_2 \cdot HV_2$	$EV_3 = V_3 \cdot HV_3$	$EV_4 = V_4 \cdot HV_4$
(EV)				
Energía del condensado (EC)	$EC_1 = V_1 \cdot HV_1$	$EV_2 = V_2 \cdot HV_2$	$EV_3 = V_3 \cdot HV_3$	$EV_4 = V_4 \cdot HV_4$
Factor de pérdida de energía	$f_1 = \left(1 - \frac{\%Perd1}{100}\right)$	$f_2 = \left(1 - \frac{\%Perd2}{100}\right)$	$f_3 = \left(1 - \frac{\%Perd3}{100}\right)$	$f_4 = \left(1 - \frac{\%Perd4}{100}\right)$

Fuente: (Garro, 2019, pág. 62)

Ecuaciones de balance en los tanques Flash entre cada evaporador

	Tanque flash 1	Tanque flash 2	Tanque flash 3
Fracción de reevaporizado	$R1 = \frac{HLc1 - HL1}{HV1 - HL1}$	$R2 = \frac{HLc2 - HL2}{HV2 - HL2}$	$R3 = \frac{HLc3 - HL3}{HV3 - HL3}$

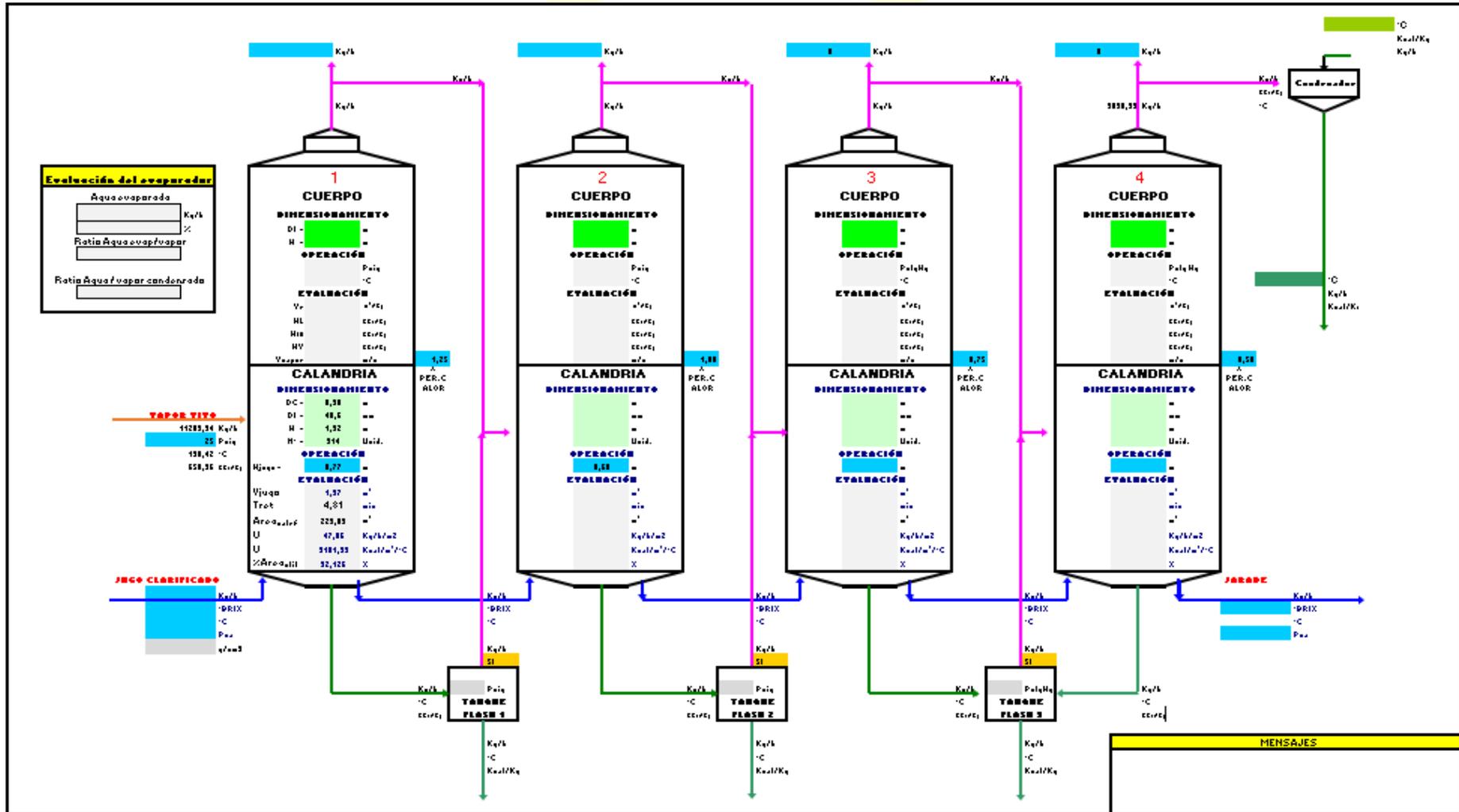
Fuente: (Garro, 2019, pág. 62)

Detalle de las ecuaciones de balance de materia y energía en los evaporadores

Cuerpo	Ecuación general	Detalle de los coeficientes
1	$a1.Vo + b1 = V1$	$a1 = \frac{f1.HVo - HLc1}{HV1 - T1}$ $b1 = \frac{Je(1 - k.Be)(f1.Te - T1)}{HV1 - T1} - P1$
2	$a2.Vo + b2 = V2$	$a2 = \frac{(a1 + R1.fR1)(f2.HV1 - HLc2) + a1(T2 - f2.T1)}{HV2 - T2}$ $b2 = \frac{b1(f2.HV1 - HLc2) + [b1 + P1 - Je(1 - kBe)](T2 - f2.T1)}{HV2 - T2} - P2$
3	$a3.Vo + b3 = V3$	$a3 = \frac{(a2 + a1.fR2.R2 + fR1.R1.fR2.R2)(f3.HV2 - HLc3) + (a2 + a1)(T3 - f3.T2)}{HV3 - T3}$ $b3 = \frac{(b2 + b1.fR2.R2)(f3.Hv2 - HLc3) + (b2 + b1 + P1 + P2 - Je(1 - kBe))(T3 - f3.T2)}{HV3 - T3} - P3$
4	$a4.Vo + b4 = V4$	$a4 = \frac{(a3 + a2.fR3.R3 + a1.fR2.R2.fR3.R3 + fR1.R1.fR2.R2.fR3.R3)(f4.Hv3 - HLc4) + (a3 + a2 + a1)(T4 - f4.T3)}{HV4 - T4}$ $b4 = \frac{(b3 + b2.fR3.R3 + b1.fR2.R2.fR3.R3)(f4.HV3 - HLc4) + (b3 + b2 + b1 + P3 + P2 + P1 - Je(1 - kBe))(T4 - f4.T3)}{HV4 - T4} - P4$

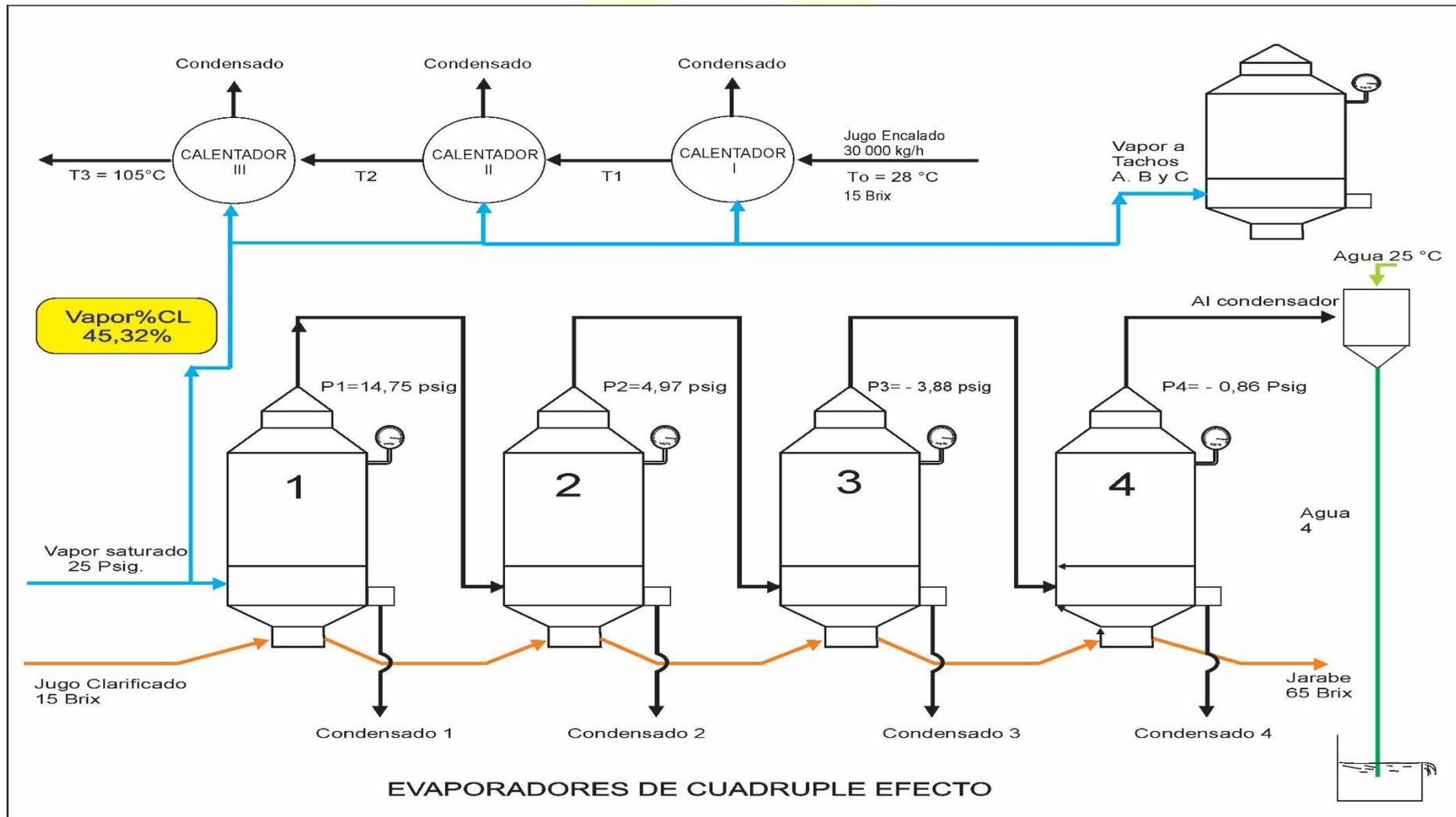
Fuente: (Garro, 2019, pág. 63)

Anexo 8. Simulador de evaporadores utilizado



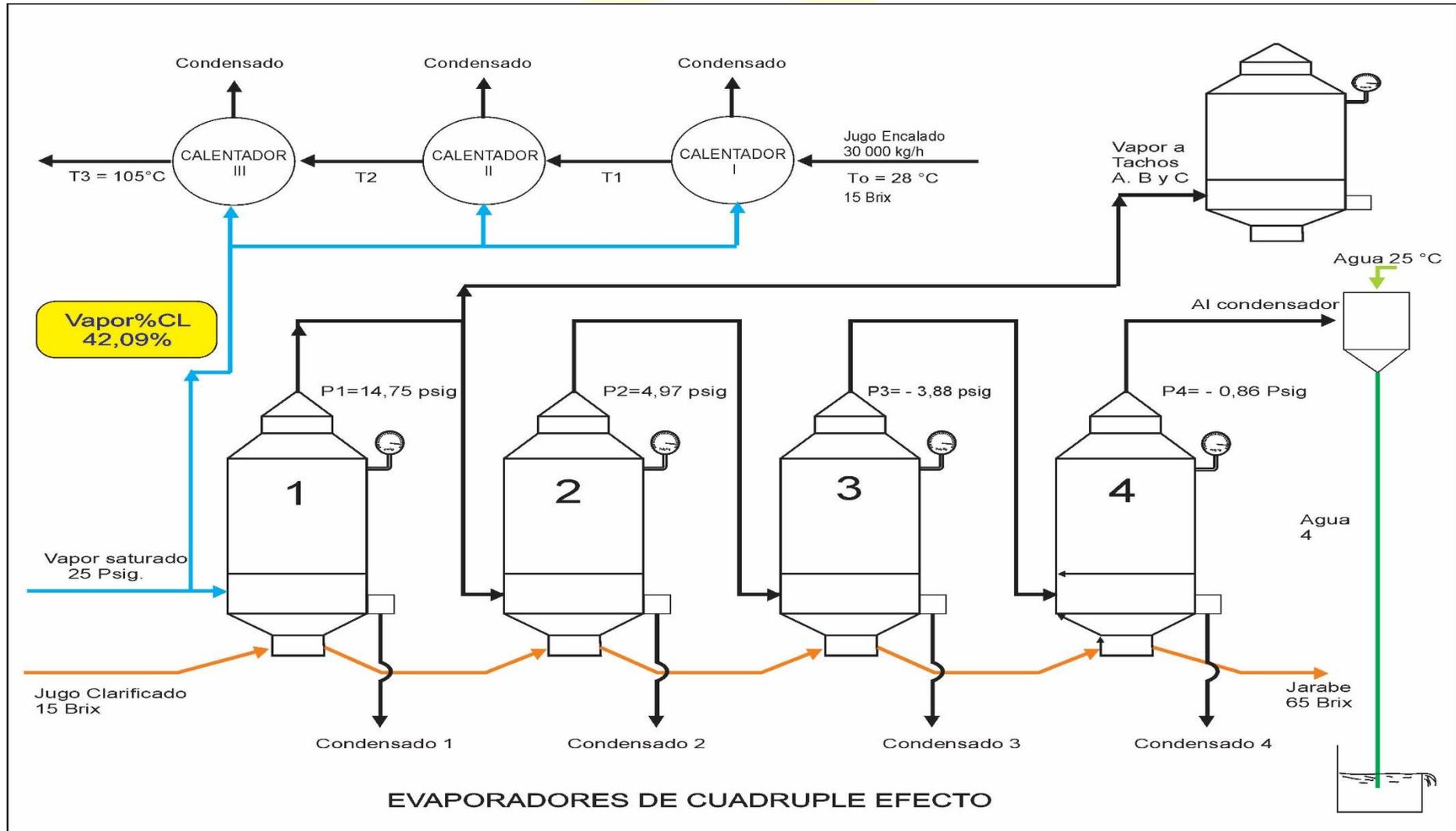
Fuente: (Garro, 2019, pág. 61)

Anexo 9. Configuración 1 del análisis del consumo de vapor



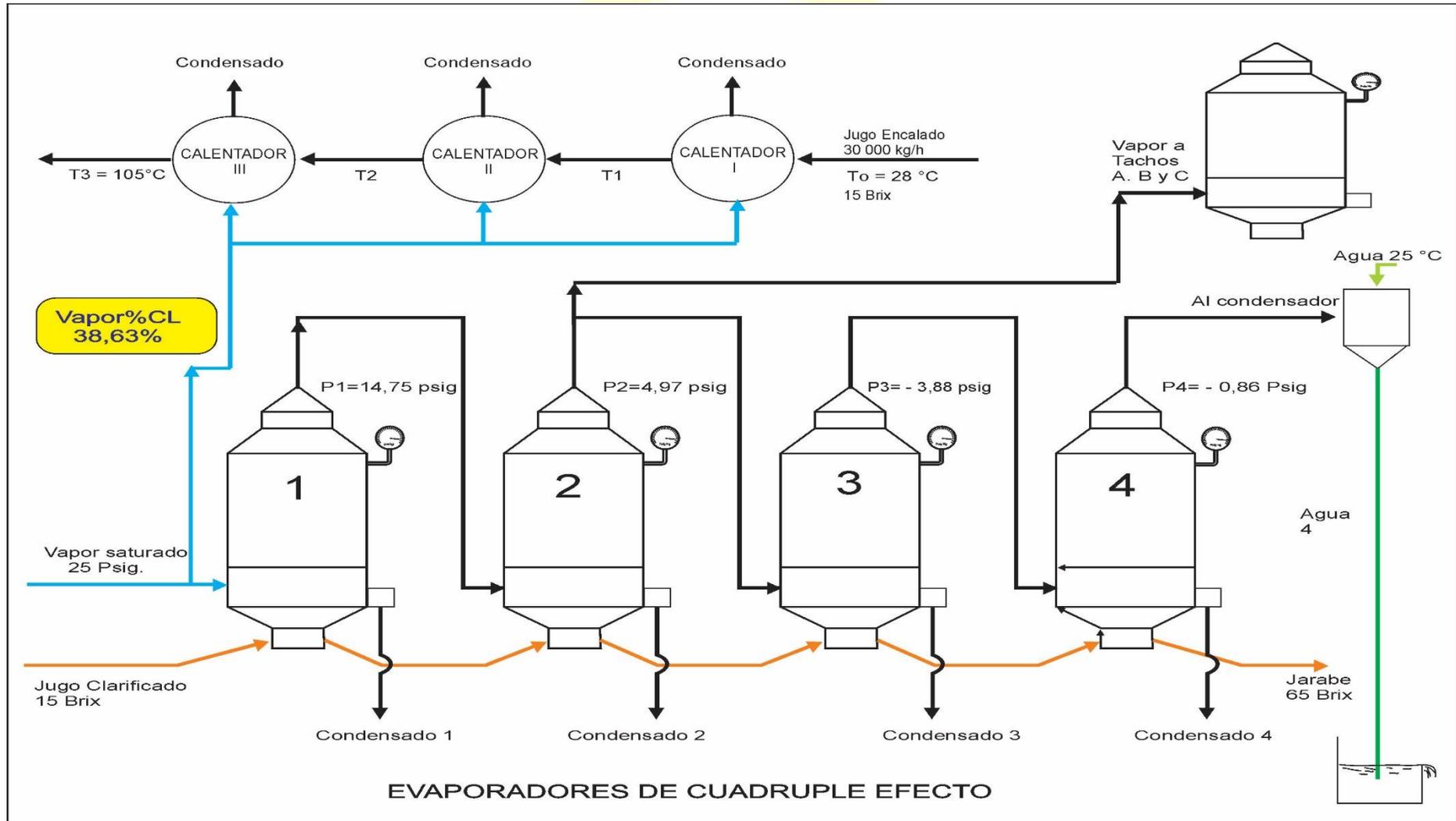
Fuente: Elaboración propia

Anexo 10. Configuración 17 del análisis del consumo de vapor



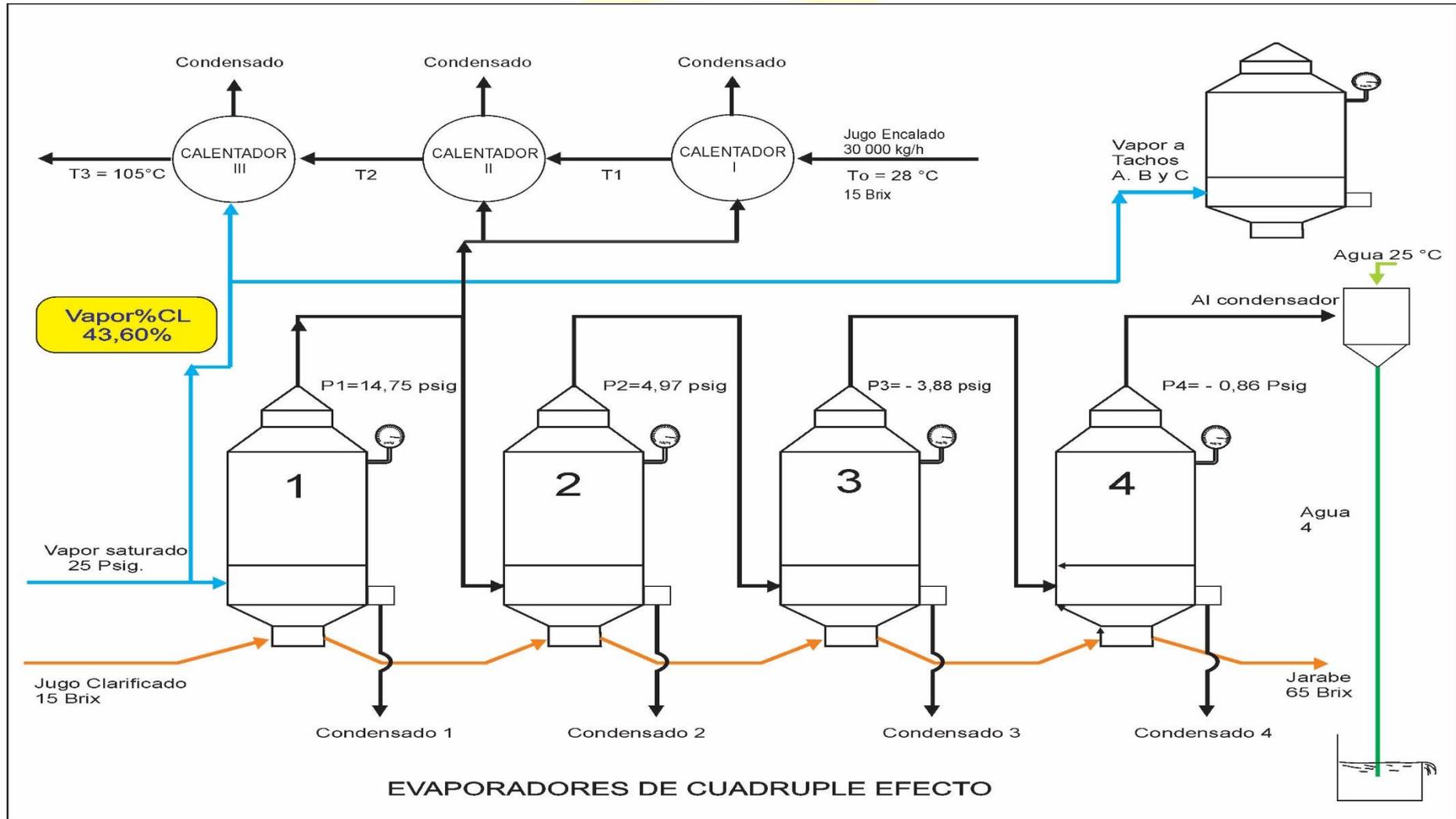
Fuente: Elaboración propia

Anexo 11. Configuración 33 del análisis del consumo de vapor



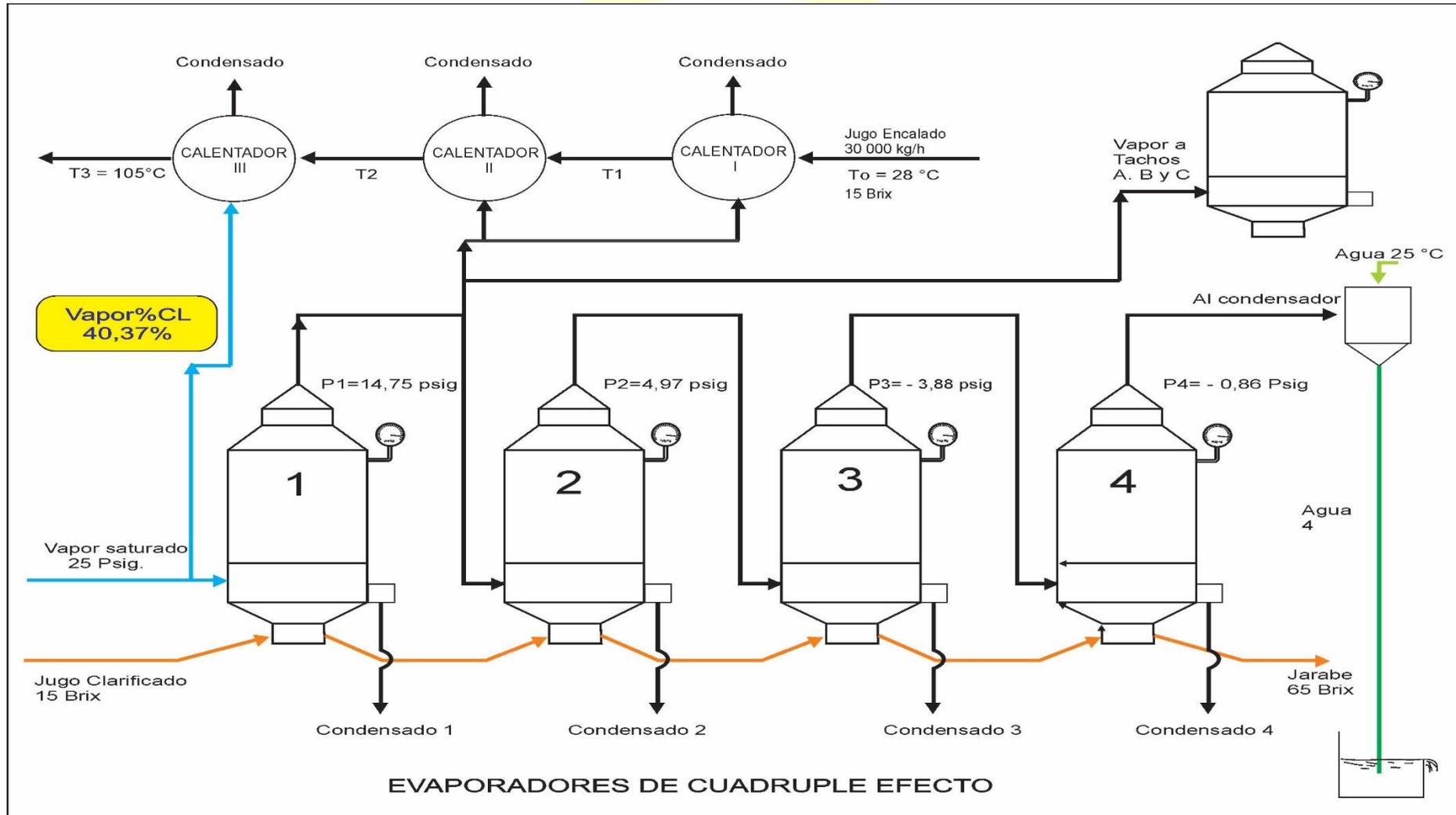
Fuente: Elaboración propia

Anexo 12. Configuración 5 del análisis del consumo de vapor



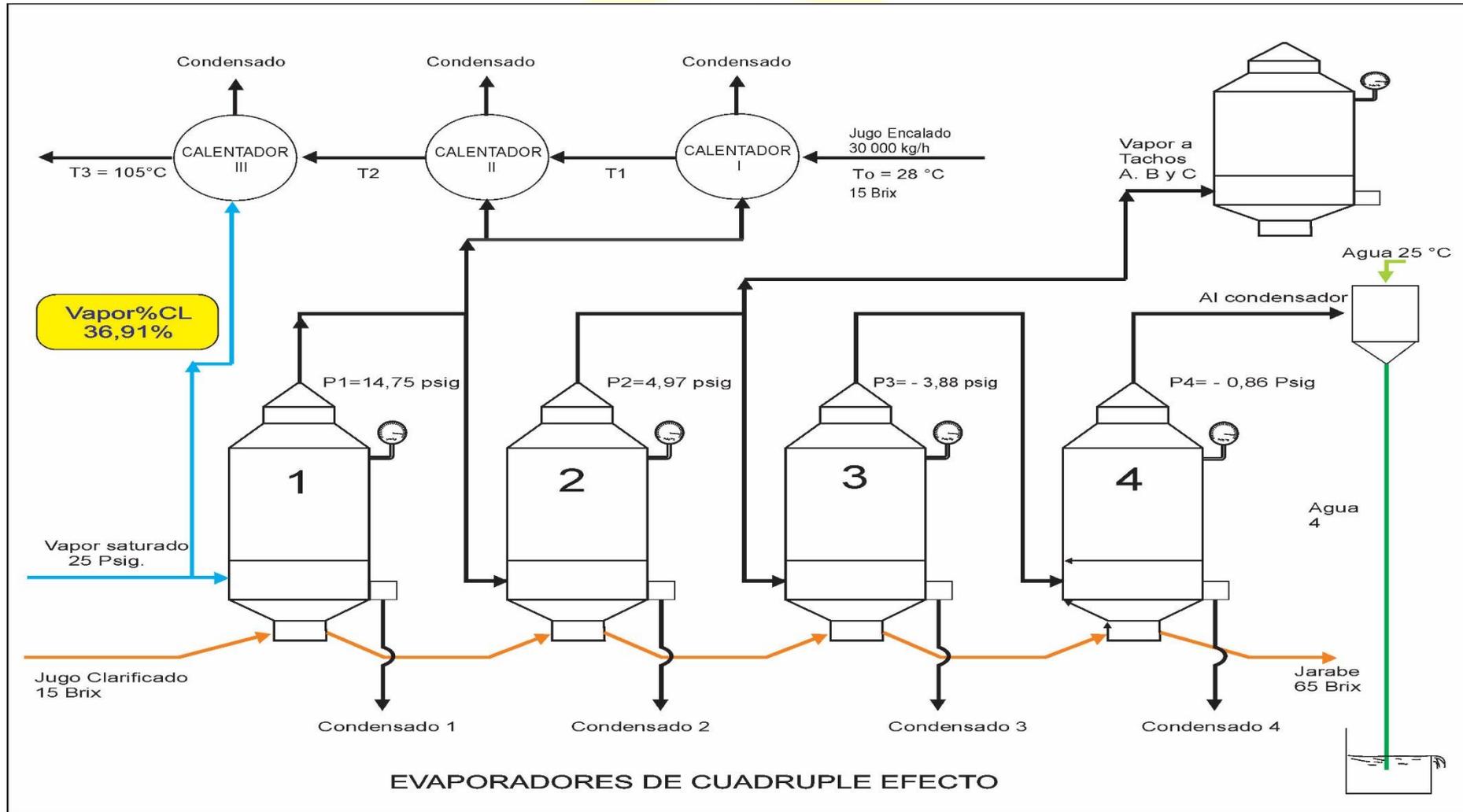
Fuente: Elaboración propia

Anexo 13. Configuración 21 del análisis del consumo de vapor



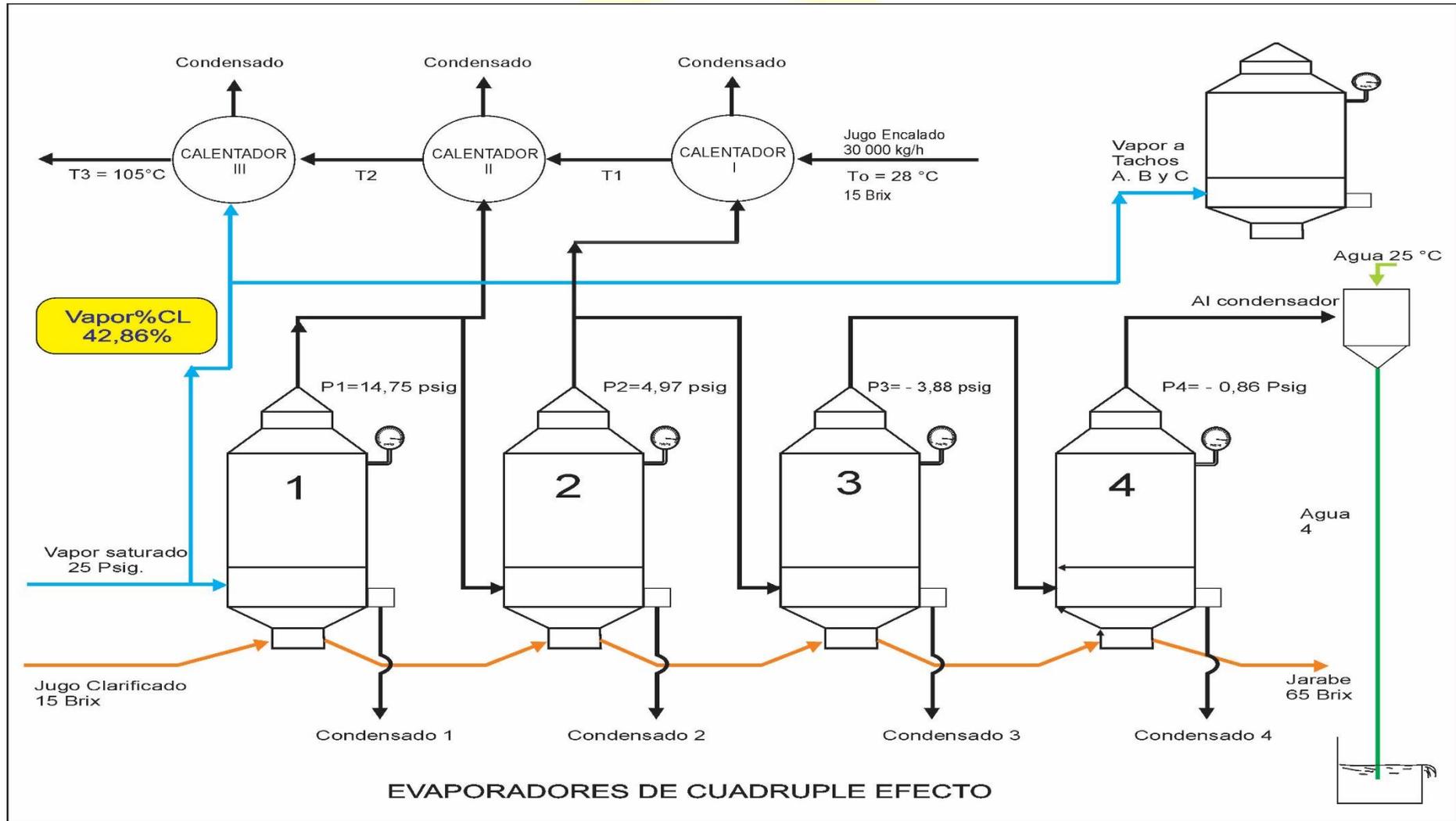
Fuente: Elaboración propia

Anexo 14. Configuración 37 del análisis del consumo de vapor



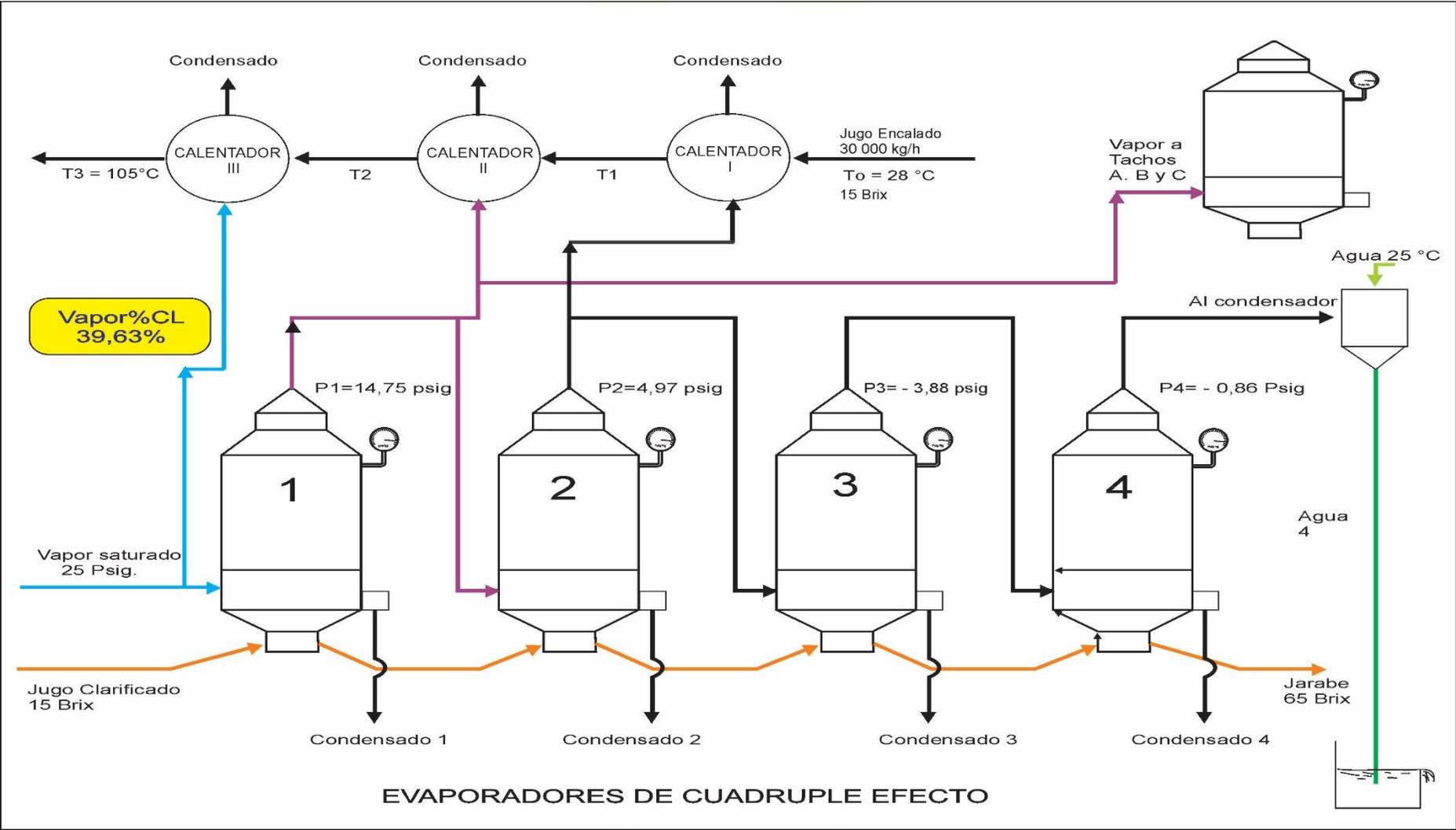
Fuente: Elaboración propia

Anexo 15. Configuración 6 del análisis del consumo de vapor



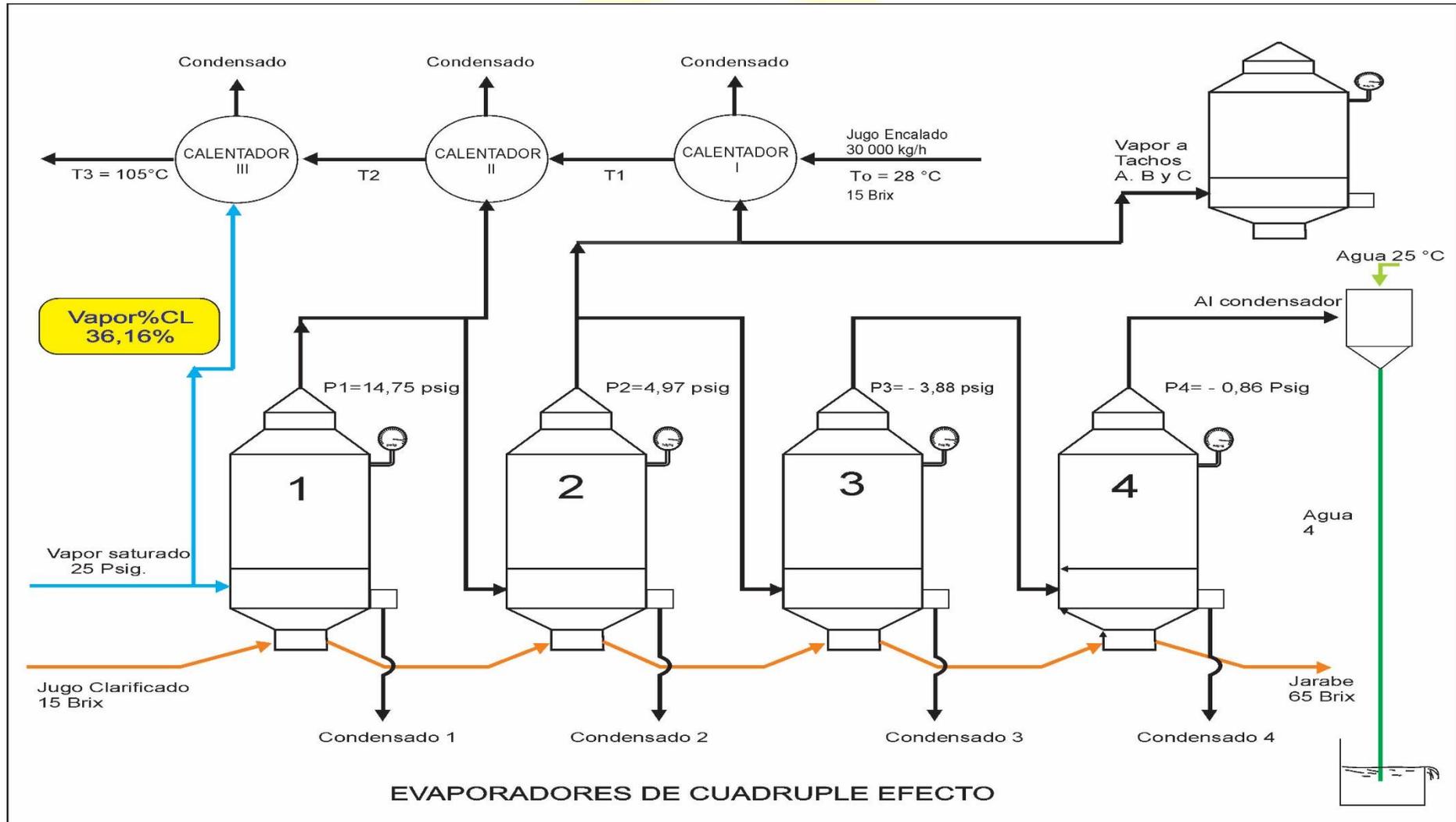
Fuente: Elaboración propia

Anexo 16. Configuración 22 del análisis del consumo de vapor



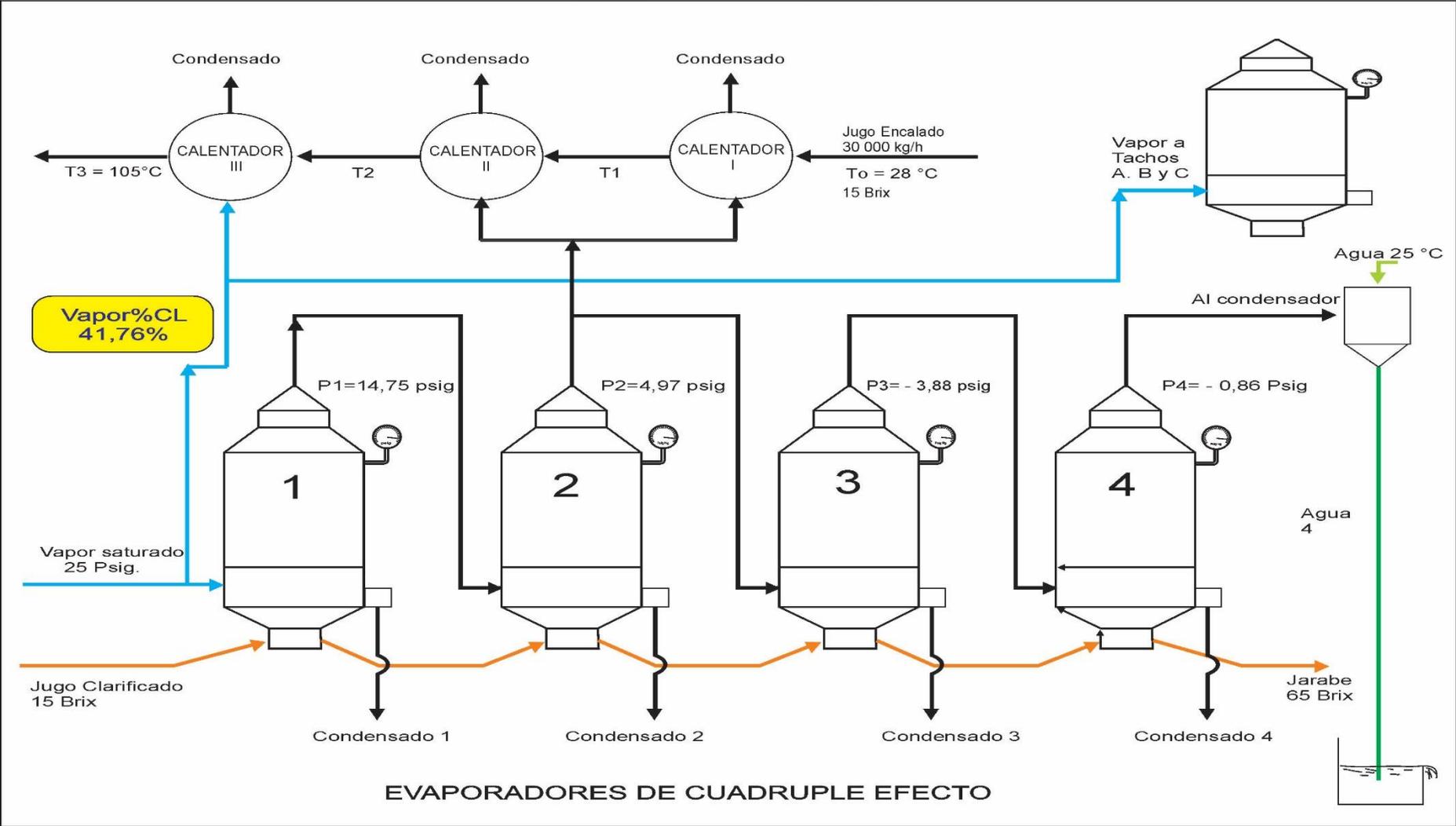
Fuente: Elaboración propia

Anexo 17. Configuración 38 del análisis del consumo de vapor



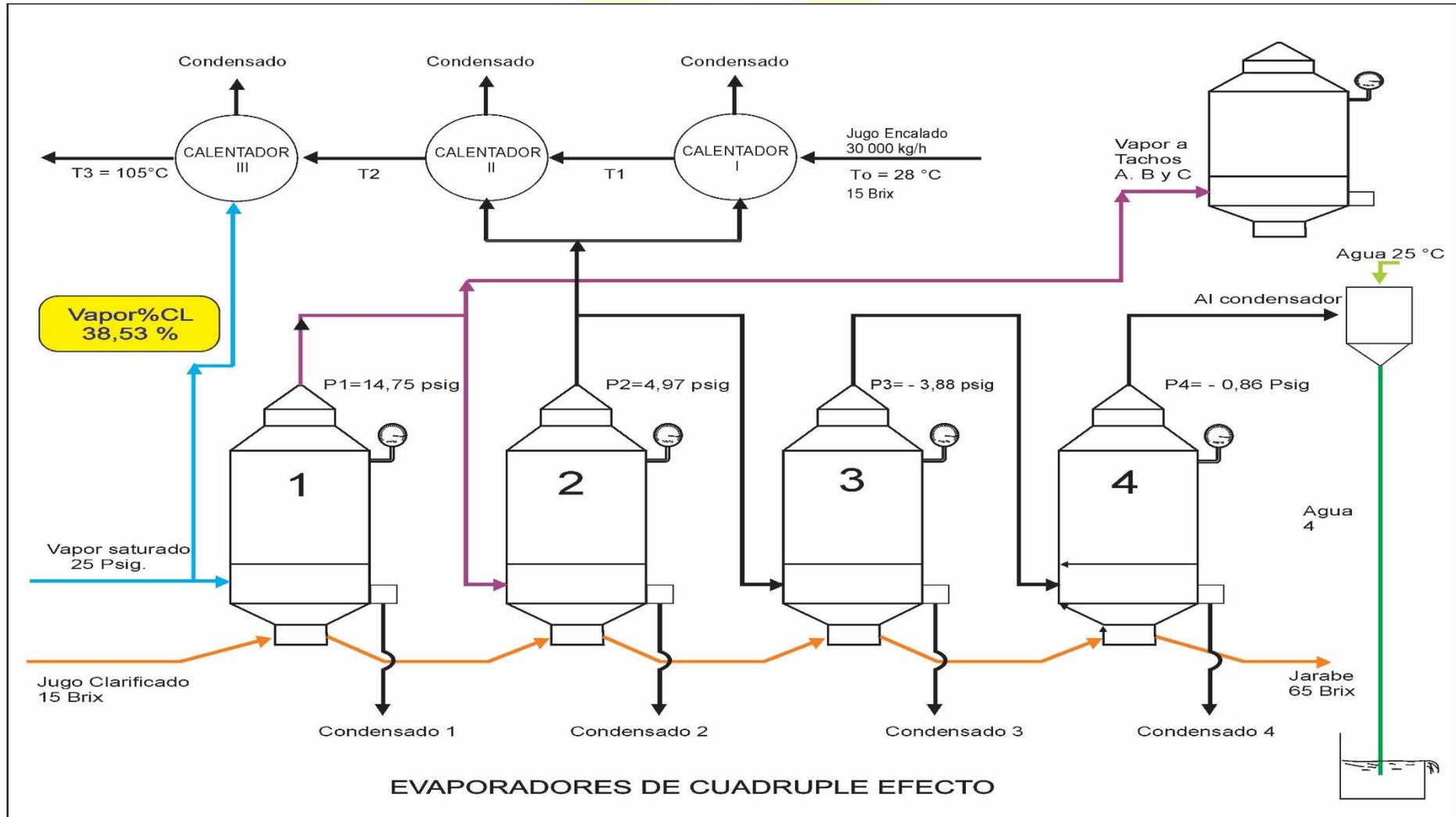
Fuente: Elaboración propia

Anexo 18. Configuración 8 del análisis del consumo de vapor



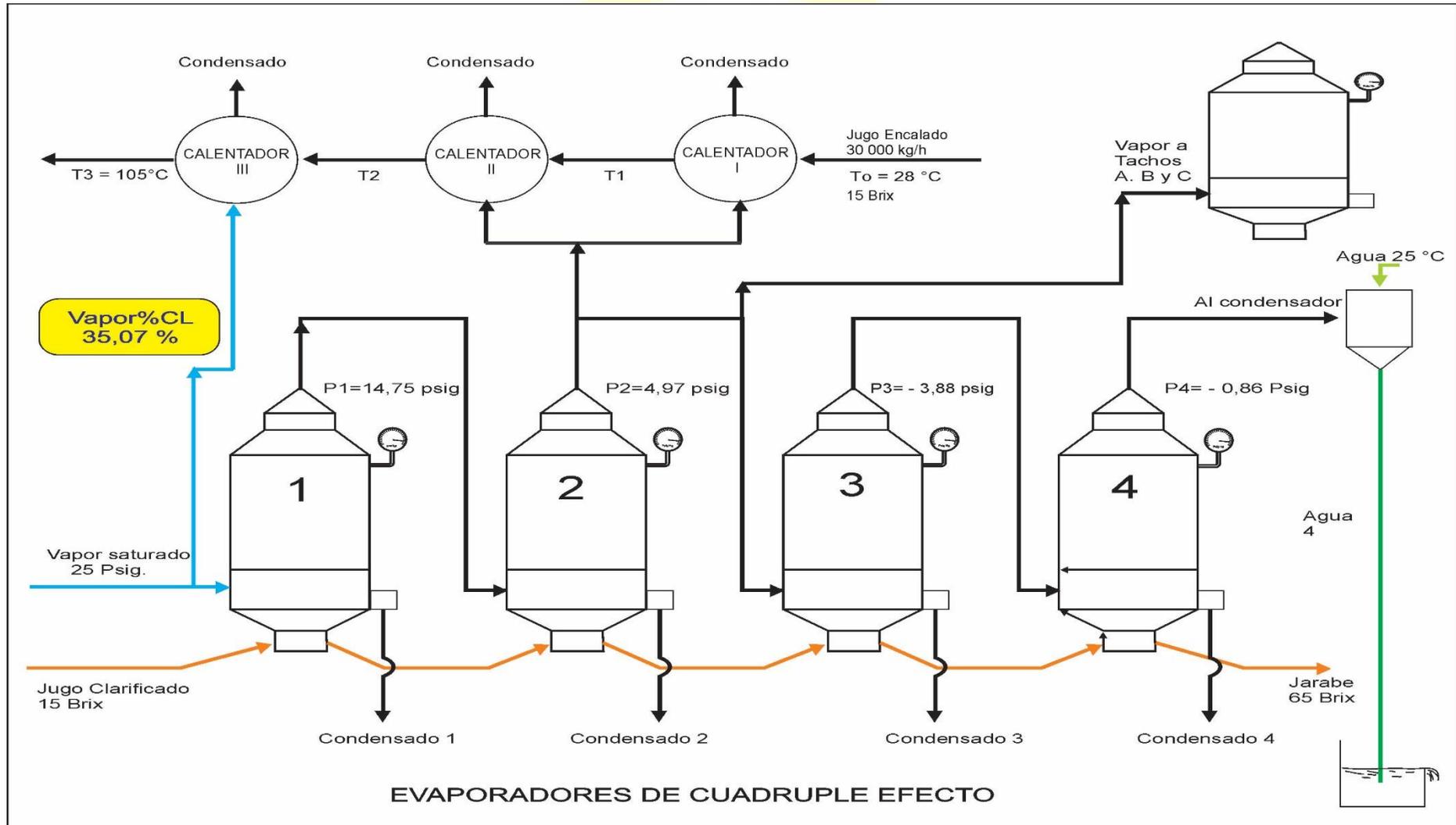
Fuente: Elaboración propia

Anexo 19. Configuración 24 del análisis del consumo de vapor



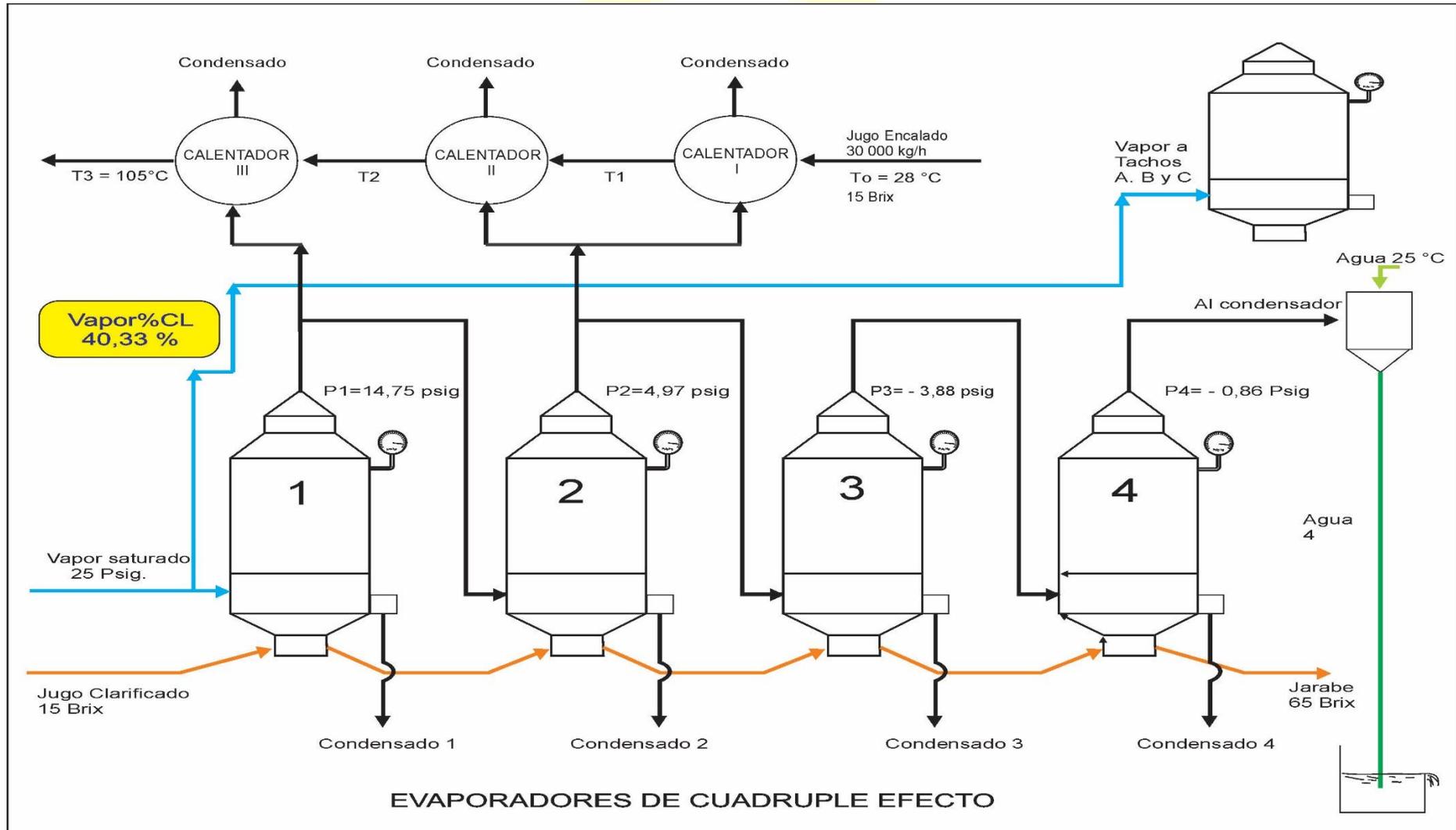
Fuente: Elaboración propia

Anexo 20. Configuración 40 del análisis del consumo de vapor



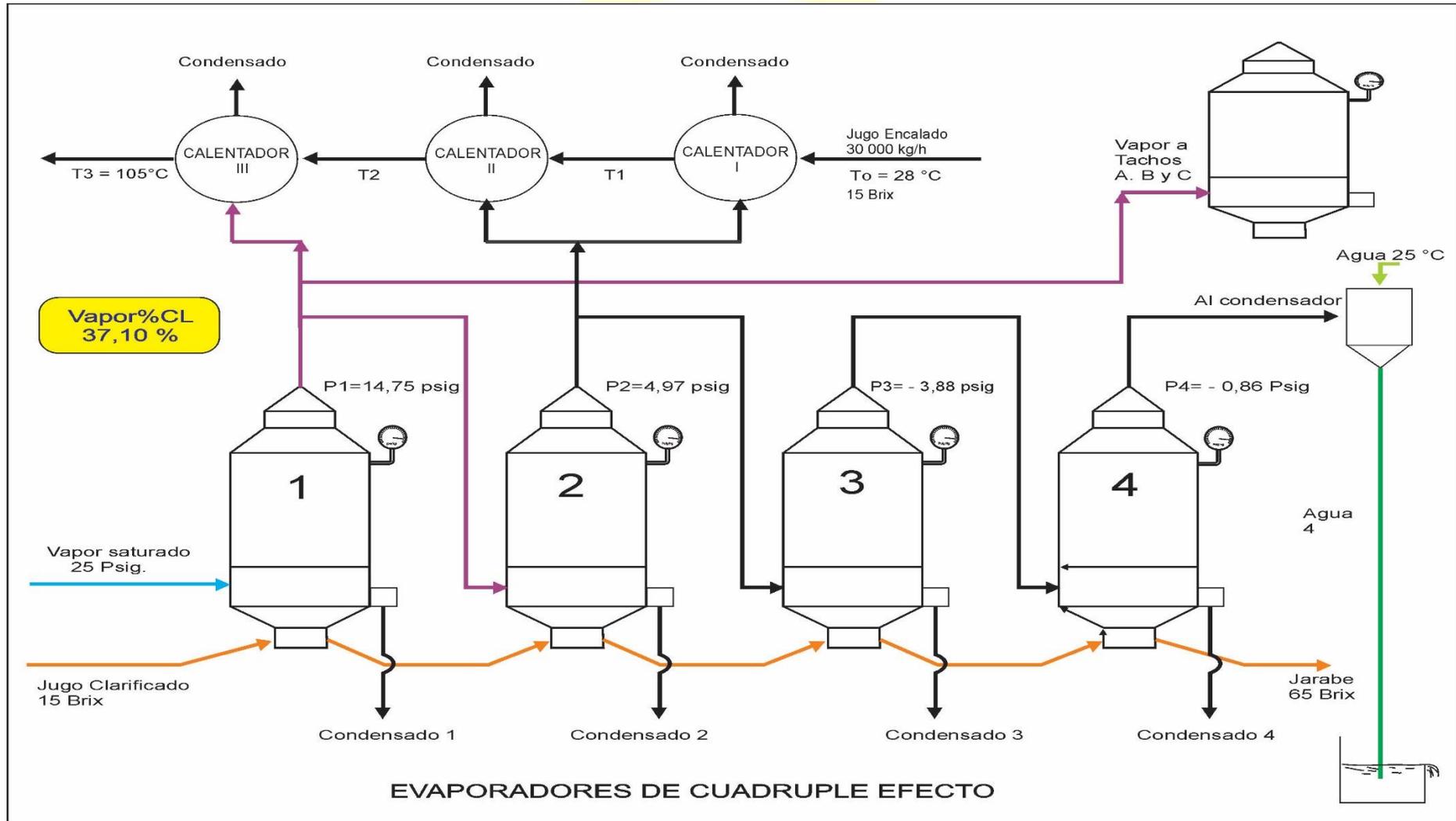
Fuente: Elaboración propia

Anexo 21. Configuración 14 del análisis del consumo de vapor



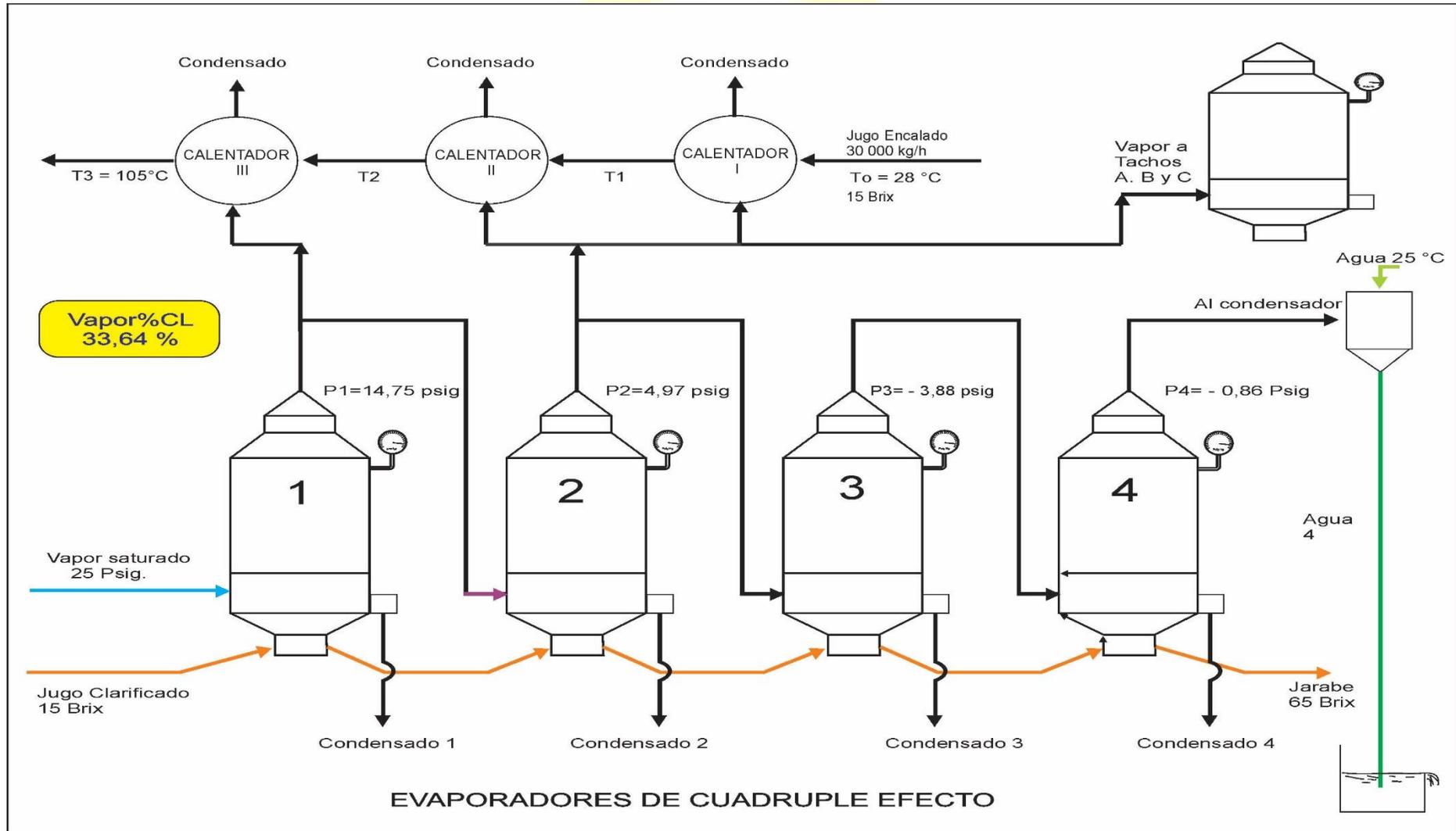
Fuente: Elaboración propia

Anexo 22. Configuración 30 del análisis del consumo de vapor



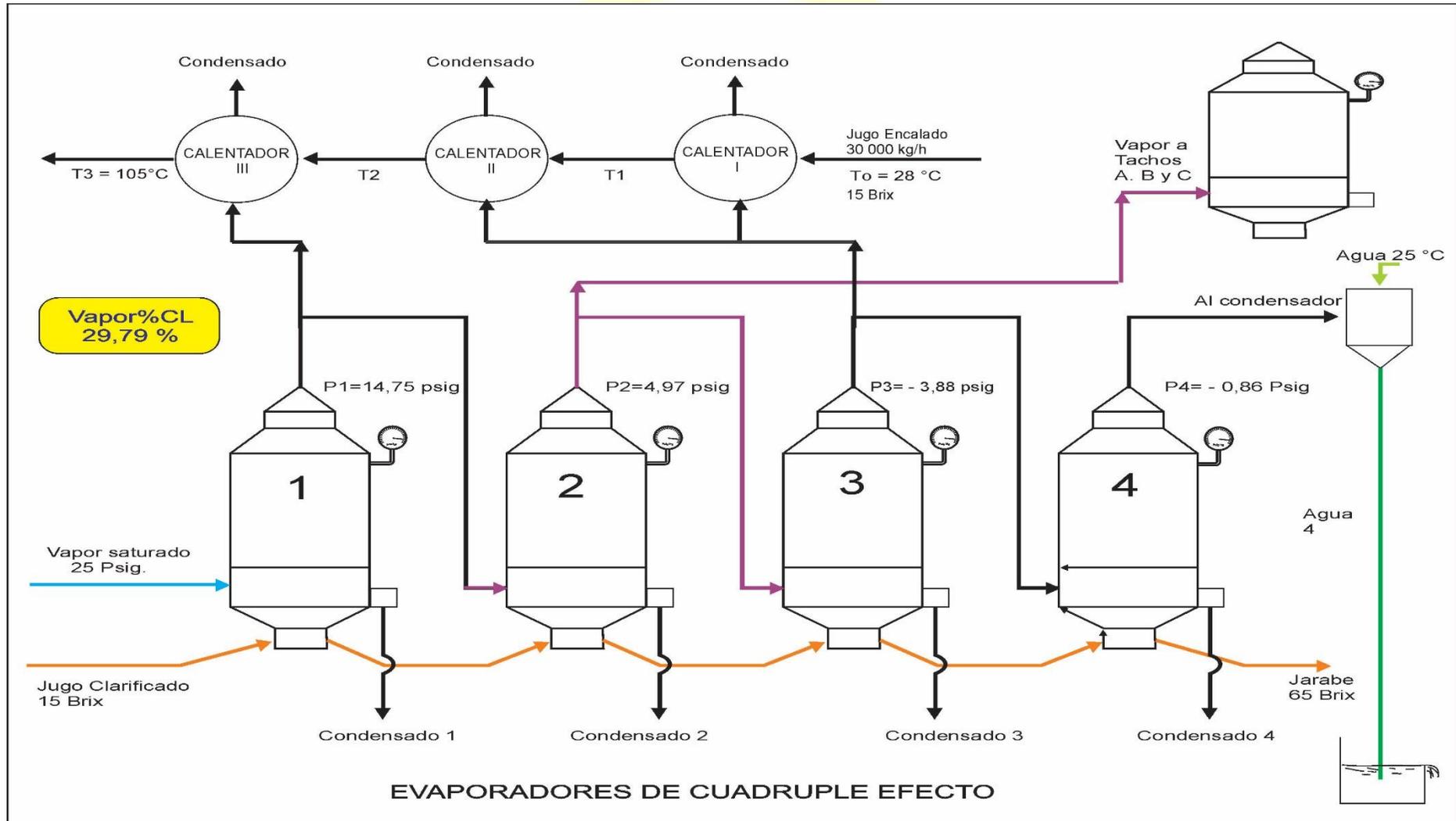
Fuente: Elaboración propia

Anexo 23. Configuración 46 del análisis del consumo de vapor



Fuente: Elaboración propia

Anexo 24. Configuración 48 del análisis del consumo de vapor



Fuente: Elaboración propia