

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL**

**DE INGENIERÍA EN ENERGÍA**



**UNS**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DEL SANTA

**"ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA POTENCIA DEL  
TURBOGENERADOR PARA LA COBERTURA DE LA DEMANDA  
MEDIANTE COGENERACION EN LA EMPRESA AGROINDUSTRIAL**

**AGROLMOS S.A.C."**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO EN ENERGÍA**

**AUTOR:**

**Bach. HUAMAN PAREDES, Luis Alberto**

**ASESOR:**

**Mg. MARIÑOS CASTILLO, Gualberto A.**

**NUEVO CHIMBOTE - PERÚ**

**2019**



Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad

## ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

A los tres días del mes de diciembre del año dos mil diecinueve, siendo las diez horas de la mañana, se instaló en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería en Energía, el Jurado Evaluador designado mediante **Resolución N° 791-2019-UNS-CFI**, integrado por los siguientes docentes:

- **Mg. AMANCIO RAMIRO ROJAS FLORES** : PRESIDENTE
- **Mg. ROBERT FABIAN GUEVARA CHINCHAYAN** : SECRETARIO
- **Mg. GUALBERTO ANTENOR MARIÑOS CASTILLO** : INTEGRANTE
- **M.Sc. ROBERTO CARLOS CHUCUYA HUALLPACHOQUE** : ACCESITARIO

Para dar inicio a la sustentación y evaluación de la Tesis titulada: "ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA POTENCIA DEL TURBOGENERADOR PARA LA COBERTURA DE LA DEMANDA MEDIANTE COGENERACIÓN EN LA EMPRESA AGROINDUSTRIAL AGROLMOS S.A.C.", elaborada por el Bachiller de Ingeniería en Energía: **LUIS ALBERTO HUAMAN PAREDES** con código de matrícula 200911021, teniendo como asesor al docente **Mg. Gualberto Antenor Mariños Castillo**, designado mediante Resolución N° 791-2017-UNS-FI..

Terminada la sustentación, el bachiller respondió las preguntas formuladas por los miembros del jurado y el público presente.

El Jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, el contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, en concordancia con el artículo 103° del Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Santa, declara:

| BACHILLER                   | PROMEDIO      | PONDERACIÓN |
|-----------------------------|---------------|-------------|
| LUIS ALBERTO HUAMAN PAREDES | 01210040 (78) | MUY BUENO   |

Siendo las once de la mañana, se da por terminado el acto de sustentación, firmando los integrantes del jurado en señal de conformidad.

  
Mg. Amancio R. Rojas Flores  
PRESIDENTE

  
Mg. Robert F. Guevara Chinchayán  
SECRETARIO

  
Mg. Gualberto A. Mariños Castillo  
INTEGRANTE



**UNS**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DEL SANTA

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL  
DE INGENIERÍA EN ENERGÍA**

**CARTA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR**

La presente Tesis ha sido revisada y desarrollada en cumplimiento del objetivo propuesto y reúne las condiciones formales y metodológicas, estando encuadrado dentro de las áreas y líneas de investigación conforme al reglamento general para obtener el título profesional en la universidad nacional del santa (R: D: N° 471-2002-CU-R-UNS) de acuerdo a la denominación siguiente:

**TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO EN  
ENERGÍA**

**Título: “ANALISIS DEL EFECTO DE LA POTENCIA DEL TURBOGENERADOR  
PARA LA COBERTURA DE LA DEMANDA MEDIANTE COGENERACION EN  
LA EMPRESA AGROINDUSTRIAL AGROLMOS S.A.C.”**

TESISTA: Bachiller: Luis Alberto Huamán Paredes

Mg. Gualberto A. Mariños Castillo

ASESOR



**UNS**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DEL SANTA

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL  
DE INGENIERÍA EN ENERGÍA**

**CARTA DE CONFORMIDAD DEL JURADO EVALUADOR DE TESIS**

Damos la conformidad del presente Informe, desarrollado en cumplimiento del objetivo propuesto y presentado conforme al Reglamento General para Obtener el Grado Académico de Bachiller y el Título Profesional en la Universidad Nacional del Santa (R.Nº 471-2002-CU-R-UNS); intitulado:

**TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO EN  
ENERGIA**

**Título: “ANALISIS DEL EFECTO DE LA POTENCIA DEL TURBOGENERADOR  
PARA LA COBERTURA DE LA DEMANDA MEDIANTE COGENERACION EN  
LA EMPRESA AGROINDUSTRIAL AGROLMOS S.A.C.”**

TESISTA: Bachiller: Luis Alberto Huamán Paredes

Revisado y Evaluado por el siguiente Jurado Evaluador:

Mg. Amancio Rojas Flores

PRESIDENTE

Mg. Gualberto Mariños Castillo

INTEGRANTE

Mg. Robert Guevara Chinchayan

INTEGRANTE

## DEDICATORIA

*A Dios por darme sabiduría y entendimiento, por iluminar cada día de mi vida y por darme la fuerza y determinación necesaria para emprender y culminar cada meta trazada en mi vida.*

*A mi madre **Julissa** por el esfuerzo, sacrificio de todos los días, su apoyo incondicional en mi vida como estudiante y mis inicios como profesional y su afán de siempre querer lo mejor para sus hijos.*

*A mi padre **Jorge Carrascal** por estar siempre pendiente de mí dándome ánimos para seguir adelante, enseñándome que en cada obstáculo que te ponga la vida siempre debes seguir adelante; con la convicción y con los valores con que me formaron para lograr cada meta trazada, y siempre recordarme que “**Los hombres rudos y fuertes como nosotros, debemos seguir adelante**”. Por su confianza en mí y su amor.*

**Luis Alberto Huamán Paredes**

## **RESUMEN**

En la presente tesis se determinó la influencia de la potencia efectiva del turbogenerador de la empresa Agrolmos S.A.C. en las características de cogeneración, utilizando la metodología de balance de energía, realizando un estudio de la demanda térmica y eléctrica del ingenio con la finalidad de poder validar la hipótesis de esta investigación que permite cubrir la demanda eléctrica en su totalidad y generar excedentes de potencia efectiva la cual se inyecta al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional. Teniendo en cuenta el rendimiento eléctrico efectivo establecido en el Reglamento de Cogeneración del Perú, se ha determinado que el incremento de la potencia efectiva de generación a 20.38 Mw permite cubrir en su totalidad la demanda requerida por la empresa y califica con un REE de 0.39 para la venta de 10.38 Mw de potencia efectiva, excedente de nuestro sistema de cogeneración.

## **ABSTRACT**

In this thesis the influence of the effective power of the turbogenerator of the company Agrolmos S.A.C. in the characteristics of cogeneration, using the methodology of energy balance, conducting a study of the thermal and electrical demand of the mill in order to validate the hypothesis of this investigation that allows to cover the electricity demand in its entirety and generate excess power effective which is injected into the National Interconnected Electric System. Taking into account the effective electrical performance established in the Cogeneration Regulation of Peru, it has been determined that the increase of the effective generation power to 20.38 Mw allows to fully cover the demand required by the company and qualify with a REE of 0.39 for the sale of 10.38 MW of effective power, surplus of our cogeneration system.

# Índice

|  |    |
|--|----|
| 1. INTRODUCCION .....  | 1  |
| 1.1. Realidad Problemática .....   | 1  |
| 1.2. Antecedentes.....   | 2  |
| 1.3. Descripción del lugar donde se ha realizado el estudio.....                 | 5  |
| 1.4. Justificación.....  | 6  |
| 1.5. Hipótesis de la Investigación:.....   | 6  |
| 1.6. Objetivos .....   | 7  |
| 1.7. Limitación de la Investigación:.....  | 7  |
| 2. MARCO TEÓRICO.....  | 8  |
| 2.1. Plantas de Cogeneración .....   | 8  |
| 2.1.1. Arreglos de las centrales de Cogeneración .....                           | 10 |
| 2.2. Plantas Azucareras de Cogeneración. ....                                    | 12 |
| 2.2.1. Caldera Acuotubular Generadora de Vapor. ....                             | 12 |
| 2.2.2. Generación de electricidad .....  | 16 |
| 2.2.2.1. Turbogenerador Eléctrico. ....  | 16 |
| 2.2.2.2. Turbina de vapor.....   | 16 |
| 2.2.2.3. Generador Eléctrico. ....   | 19 |
| 2.3. Principales arreglos de Cogeneración en los ingenios azucareros. ....       | 20 |
| 2.4. Procesos de Azúcar en un Ingenio azucarero .....                            | 23 |
| 2.5. Consumo de Vapor para Movimientos Principales en el Ingenio Azucarero. .... | 29 |
| 2.6. Requerimiento de vapor para principales procesos de azúcar .....            | 30 |
| 2.6.1. Calentamiento en el difusor .....   | 30 |
| 2.6.2. Calentamiento del jugo de jarabe .....                                    | 30 |
| 2.6.3. Evaporadores.....   | 31 |
| 2.6.4. Extracción de vapor .....   | 32 |
| 2.6.5. Requerimiento de vapor en tachos Batch y Tachos Continuos .....           | 33 |
| 2.6.6. Consumo de vapor en el Desaireador.....                                   | 33 |
| 2.6.7. Pérdidas de Vapor .....   | 34 |
| 2.7. Calificación de las Centrales de Cogeneración para Venta de energía .....   | 35 |
| 2.7.1. Reglamento de la cogeneración.....  | 35 |
| 3. MATERIALES Y METODO.....  | 38 |
| 3.1. Materiales.....   | 38 |

|  |     |
|--|-----|
| 3.2. Método de Investigación .....   | 40  |
| 3.2.1. Metodología de Balance de Energía .....   | 40  |
| 3.2.2. Determinación de Variables, Indicadores y costos .....                          | 41  |
| 3.3. Aplicación de Metodología .....   | 42  |
| 4. RESULTADOS .....  | 69  |
| 4.1. Cálculos de Vapor en el Sistema de Difusor. ....                                  | 69  |
| 4.2. Consumo en los Calentadores de Jugo Colado. ....                                  | 73  |
| 4.3. Consumo de Vapor en el Calentador DCH de Jugo Claro .....                         | 75  |
| 4.4. Consumo de Vapor en el Calentador DCH de Jarabe Crudo. ....                       | 76  |
| 4.5. Cálculo de Consumo de Vapor en los Sistemas de Tachos Batch .....                 | 77  |
| 4.6. Cálculo de Consumo de Vapor en los Sistemas de Tachos Continuos. ....             | 80  |
| 4.7. Consumo de Vapor en los Evaporadores.....   | 83  |
| 4.8. Consumo de vapor en el Desaireador.....   | 87  |
| 4.9. Consumo de vapor en el Turbogenerador .....                                       | 88  |
| 4.10. Consumo de agua en el Atemporador. ....  | 89  |
| 4.11. Calculo de la Eficiencia en los Generadores de Vapor por el Método Directo. .... | 89  |
| 4.12. Balance de Vapor Actual del Ingenio Agrolmos.....                                | 91  |
| 4.13. Balance de Vapor y Energía Actual del Ingenio Agrolmos .....                     | 92  |
| 4.14. Esquema Resumen Actual en el Ingenio Agrolmos.....                               | 93  |
| 4.15. Proyecto Venta de Energía – Nuevo Turbogenerador .....                           | 95  |
| 4.16. Consumo de Flujos en el generador de vapor para nuevo turbogenerador .....       | 96  |
| 4.17. Consumo de Vapor en el Desaireador .....   | 97  |
| 4.18. Balance de Vapor y Energía del Ingenio Agroindustrial Agrolmos. ....             | 98  |
| 4.19. Esquema resumen con el Nuevo Turbogenerador .....                                | 99  |
| 4.20. Costos de Generación Actual .....  | 101 |
| 4.21. Costos de Generación con Venta de Energía Eléctrica a la Red .....               | 103 |
| 4.22. Evaluación Económica.....  | 105 |
| 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....  | 106 |
| 6. CONCLUSIONES .....  | 108 |
| 7. RECOMENDACIONES .....   | 109 |
| 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....  | 110 |
| 9. ANEXOS.....   | 112 |

## Índice de Tablas

|   |     |
|---|-----|
| Tabla N° 1: Parámetros de calificación.....                                     | 37  |
| Tabla N° 2: Balance de flujos en el difusor.....                                | 69  |
| Tabla N° 3: Consumo de vapor en los inyectores a difusor .....                  | 70  |
| Tabla N° 4: Consumo de vapor en los calentadores de jugo mixto.....             | 71  |
| Tabla N° 5: Datos para balance de vapor en los calentadores de jugo colado..... | 73  |
| Tabla N° 6: Consumo de vapor en los calentadores de jugo colado.....            | 74  |
| Tabla N° 7: Consumo de vapor en los calentadores de jugo claro .....            | 75  |
| Tabla N° 8: Consumo de vapor en el calentador de jarabe crudo.....              | 76  |
| Tabla N° 9: Consumo de vapor en Tacho Batch B/C .....                           | 78  |
| Tabla N° 10: Consumo de vapor en Tacho Batch A/B.....                           | 79  |
| Tabla N° 11: Consumo de vapor en Tacho Batch A .....                            | 80  |
| Tabla N° 12: Consumo de vapor en Tacho Continuo C.....                          | 81  |
| Tabla N° 13: Consumo de vapor en Tacho Continuo B.....                          | 82  |
| Tabla N° 14: Consumo de vapor en Tacho Continuo A.....                          | 83  |
| Tabla N° 15: Balance de flujos en los evaporadores.....                         | 83  |
| Tabla N° 16: Parámetros del vapor en los evaporadores.....                      | 84  |
| Tabla N° 17: Consumos de vapor en los efectos de evaporización.....             | 84  |
| Tabla N° 18: Balance por el Método Riileux.....                                 | 85  |
| Tabla N° 19: Consumo de vapor en el desaireador.....                            | 87  |
| Tabla N° 20: Balance de Energía eléctrica del Ingenio Agrolmos.....             | 88  |
| Tabla N° 21: Eficiencia del generador de vapor.....                             | 90  |
| Tabla N° 22: Indicadores actuales de cogeneración.....                          | 93  |
| Tabla N° 23: Balance mensual actual del Ingenio Agrolmos.....                   | 94  |
| Tabla N° 24: Indicador de eficiencias del generador de vapor .....              | 96  |
| Tabla N° 25: Consumo de vapor en el Desaireador con Nuevo Turbogenerador.....   | 97  |
| Tabla N° 26: Indicadores de Calificación con Nuevo Turbogenerador .....         | 99  |
| Tabla N° 27: Balance mensual con Nuevo turbogenerador.....                      | 100 |
| Tabla N° 28: Costos e Ingresos Actuales Sin venta de Energía Eléctrica. ....    | 102 |
| Tabla N° 29: Costos e ingresos con venta de Energía Eléctrica .....             | 104 |

## Índice de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura N° 1: Sistema de una planta de cogeneracion.....                     | 8  |
| Figura N° 2: Eficiencia y ahorro de energia prima .....                     | 9  |
| Figura N° 3: Sistemas de arreglos en la cogeneración.....                   | 11 |
| Figura N° 4: Generador de vapor Acuotubular de Alta Presión.....            | 13 |
| Figura N° 5: Partes de un generador de vapor .....                          | 15 |
| Figura N° 6: sistema Turbogenerador.....                                    | 16 |
| Figura N° 7: Partes de una Turbina de Vapor .....                           | 17 |
| Figura N° 8: Turbina de condensación.....                                   | 18 |
| Figura N° 9: Turbina de contrapresión.....                                  | 18 |
| Figura N° 10: Sistema generador y excitatriz.....                           | 20 |
| Figura N° 11: Diagrama tradicional de un ingenio azucarero .....            | 20 |
| Figura N° 12: Diagrama optimizado de un ingenio azucarero .....             | 21 |
| Figura N° 13: Diagrama actual de un ingenio azucarero .....                 | 22 |
| Figura N° 14: Proceso de molienda .....                                     | 23 |
| Figura N° 15: Sistema clarificador.....                                     | 24 |
| Figura N° 16: Sistema de evaporadores en serie.....                         | 24 |
| Figura N° 17: Procesos de una planta azucarera de cogeneracion.....         | 26 |
| Figura N° 18: Diagrama de elaboración de Azúcar Blanca.....                 | 27 |
| Figura N° 19: Diagrama de elaboración de Azúcar Rubia.....                  | 28 |
| Figura N° 20: Sistema Difusor para extracción de sacarosa .....             | 30 |
| Figura N° 21: Calentador carcaza/tubo y Calentador de contacto directo..... | 31 |
| Figura N° 22: Arreglo de evaporadores de 4 efectos en serie.....            | 33 |
| figura N° 23: Sistema Desaireador.....                                      | 34 |
| Figura N° 24: Software Figener y Software Scada .....                       | 39 |
| Figura N° 25: Balance de Energia.....                                       | 40 |
| Figura N° 26: Diagrama de entalpia vs entropia.....                         | 43 |
| Figura N: 27: Balance de masas en el evaporador.....                        | 53 |
| Figura N° 28: Diagrama de evaporadores.....                                 | 55 |
| Figura N° 29: Balance de masas en un Tacho Bach .....                       | 56 |
| Figura N° 30: Total de masas en un Tacho Batch .....                        | 57 |
| Figura N° 31: Balance de vapor en un Tacho Batch.....                       | 57 |
| Figura N° 32: Balance de masas en un Tacho Continuo .....                   | 58 |
| Figura N° 33: Total de masas en un Tacho Continuo.....                      | 60 |
| Figura N° 34: Balance de vapor en un Tacho Continuo .....                   | 60 |
| Figura N° 35: Esquema en el desaireador.....                                | 61 |
| Figura N° 36: sistema Reductor de presión .....                             | 63 |
| Figura N° 37: Esquema de Vapor del Ingenio Azucarero Agrolmos .....         | 65 |
| Figura N° 38: Flujo de caja en un periodo de tiempo "n" análisis .....      | 66 |
| Figura N° 39: Flujos en el sistema difusor.....                             | 72 |
| Figura N° 40: Flujos de vapor en los Calentadores de jugo colado .....      | 75 |
| Figura N° 41: Flujos de vapor en los DCH de jugo claro.....                 | 76 |
| Figura N° 42: Flujo de vapor en el DCH de jarabe crudo .....                | 77 |
| Figura N° 43: Balance de vapor en Tacho Batch B/C .....                     | 77 |
| Figura N° 44: Balance de vapor en Tacho Batch A/B .....                     | 78 |
| Figura N° 45: Balance de vapor en Tacho Batch A.....                        | 79 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura N° 46: Balance de vapor en Tacho Continuo C .....                           | 80  |
| Figura N° 47: Balance de vapor en Tacho Continuo B .....                           | 81  |
| Figura N° 48: Balance de vapor en Tacho Continuo A .....                           | 82  |
| Figura N° 49: Diagrama de flujos en los evaporadores de Película Descendente ..... | 86  |
| Figura N° 50: Diagrama de flujos del Desaireador.....                              | 87  |
| Figura N° 51: Diagrama de flujos en el atemperador 1 y 2.....                      | 89  |
| Figura N° 52: Esquema de producción de vapor del generador.....                    | 90  |
| Figura N° 53: Balance de vapor del Ingenio Agroindustrial Agrolmos.....            | 91  |
| Figura N° 54: Balance de energía del Ingenio Agroindustrial Agrolmos .....         | 92  |
| Figura N° 55: Balance de Masa y Energía Actual del Ingenio Agrolmos .....          | 93  |
| Figura N° 56: Balance Energético del Ingenio Agrolmos.....                         | 94  |
| Figura N° 57: Flujos de consumo en el Generador de Vapor.....                      | 96  |
| Figura N° 58: Flujos en el Desaireador.....  | 97  |
| Figura N° 59: Balance de Vapor y Energía - Nuevo Turbogenerador.....               | 98  |
| Figura N° 60: Balance de Masa y Energía - Nuevo Turbogenerador.....                | 99  |
| Figura N° 61: Balance Energético - Nuevo Turbogenerador.....                       | 100 |

## **1. INTRODUCCION**

### **1.1. Realidad Problemática**

La energía juega un papel importante como insumo en las actividades de producción y consumo en los sistemas. Los elevados costos de operación han derivado en la búsqueda de la integración y optimización de los procesos energéticos con la finalidad de mejorar el uso eficiente de la energía.

La Empresa Agroindustrias Agrolmos es una planta de cogeneración que cuenta con una Turbina de vapor TGM que es utilizada para la generación de energía eléctrica para abastecer al ingenio, que tiene como principal actividad económica cultivar y procesar la caña de azúcar, produciendo azúcar y derivados de primera calidad.

Actualmente la Empresa Agrolmos no cuenta con un balance de Energía actualizado, requisito indispensable para poder calificar como una central de Cogeneración y vender excedentes de energía eléctrica. Esto permite evaluar el uso eficiente de la Energía térmica para obtener energía eléctrica.

Para cumplir con el objetivo hemos realizado la actividad.

El balance de energía es una metodología que nos permite mejorar la generación de energía y aprovecharla al máximo, elevando el rendimiento de planta. También nos permite determinar irreversibilidades o pérdidas energéticas y determinar la cobertura de demanda térmica y eléctrica de la planta, reduciendo costos y generando ahorro en energía, es decir proporciona un beneficio energético y económico a la empresa.

Ante esta realidad nos planteamos la siguiente interrogante:

¿Cuál es el efecto de la potencia del turbogenerador para la cobertura de la demanda mediante cogeneración en la empresa Agroindustrial Agrolmos S.A.C.?

## 1.2. Antecedentes

- **Domínguez, G. y Pérez, F. (2011).** "Cogeneración utilizando vapores excedentes de la caldera Kessel Anlage de Sider Perú". El siguiente trabajo consiste en dimensionar un sistema de cogeneración con turbina de Vapor que permita aprovechar la capacidad de producción de la caldera Kessel Anlage, la cual viene operando a bajos factores de carga, suministrando vapor para procesos de la planta siderúrgica SIDERPERU.

Logrando cuantificar las energías suministradas, el calor útil y también los ahorros de energía primaria y la reducción de la facturación de insumos energéticos. El desarrollo de este informe tiene una rentabilidad económica de diseño de cogeneración y beneficios técnicos, económicos y ambientales.

- **Gutiérrez, J. y Orue, E. (2012).** "Estudio para el diseño de un sistema de cogeneración calificada para la empresa Agroindustrial Cartavio S.A.A." Perú. En el siguiente trabajo se reemplazaron las turbinas de vapor por motores eléctricos y así incrementar una potencia instalada a 14,2 MW y un flujo de 38.968 MW.

Logrando obtener según cálculos una potencia efectiva en la salida de los bornes del generador de 19.36 MW y un excedente de 5.16 MW para poder vender al sistema interconectado Nacional y un Rendimiento Eléctrico efectivo de 0.3, que permite calificar para la venta de energía y potencia. Realizando una evaluación económica con una inversión de \$. 11 040, 00. 00 para adquirir un nuevo caldero y un turbogenerador a una tasa de interés del 12% del mercado y un tiempo de retorno de 10 años. Obteniendo un VAN igual a \$. 9 462 074.21, y una tasa de interés de retorno de 15.44%.

- **Chunga, E. y Cam, F. (2013).** “Influencia del incremento de la potencia efectiva en cogeneración de energía de la empresa Cartavio S.A.A.” Perú. En el siguiente trabajo se determinó la influencia de la potencia efectiva generada en los turbogeneradores de la Empresa Cartavio S.A.A. en las características de la cogeneración, realizándose en estudio de la demanda térmica, eléctrica, potencia térmica suministrada y del stock del bagazo disponible, con la finalidad de cubrir la demanda eléctrica en su totalidad para el ingenio, generar excedentes y calificar al sistema eléctrico interconectado nacional. Se determina que la potencia efectiva de generación a 9.5 Mw, permite cubrir la demanda deseada de planta de 8.5 Mw y calificar al reglamento de cogeneración con un REE de 0.378 para la inyección de 1 Mw de potencia efectiva excedente
- **Sandoval, A. (2013).** "Balance de energía del complejo Agroindustrial Cartavio S.A.A. con escenarios de generación para la venta de energía eléctrica" Perú. En el siguiente trabajo se determinó que las pérdidas de vapor permisibles en un ingenio de alta eficiencia son de 3%, actualmente el ingenio supera los 5% de perdidas, por lo que debe ser un objetivo primordial disminuir los porcentajes y aumentar la eficiencia del ingenio.

Para la venta de energía no se consideró la disminución de pérdidas para realizar una mejor comparación entre el estado actual y los escenarios futuros, creando cuatro posibles escenarios de venta de energía para una ganancia de 1,292,585.38 USD ; 1,353,936.16 USD ; 1,417,486.17 USD y 1,469,131.78 USD para los escenarios N° 01, 02, 03 y 04 respectivamente con las perdida de 610,316.53 en el estado actual.

- **Samira, K. (2016).** “Modelo de simulación de una planta de cogeneración mediante el simulador de procesos HYSYS” Escuela técnica superior de Ingeniería, Sevilla. En el siguiente trabajo se ejecutó la implementación en el simulador de procesos HYSYS de un modelo de una planta de cogeneración de la refinería la Rábida de CEPSA, que suministra vapor a un emplazamiento

industrial de refino de petróleo y genera aproximadamente 50 MW de potencia eléctrica. Para estos efectos, se describió principalmente sus componentes y su funcionamiento, se modeló la planta de cogeneración en ambiente estático y se ejecutó la simulación del sistema de la caldera en estado dinámico, empleando como parámetros de diseño los datos reales de la planta.

Posteriormente se comprobaron los valores reales de operación de la planta con los valores del modelo simulado, y se concluyó que las similitudes son adecuadas dentro del rango de precisión satisfactorio. Además, la simulación dinámica ha permitido probar distintas estrategias de control tipo PID y cascada hasta conseguir proporcionar los mejores resultados.

Por último, se comprobó la estabilidad y validez del modelo dinámico introduciendo cambios en los parámetros de caudal y temperatura del combustible y de los gases de escape de la turbina de gas. Todos los resultados obtenidos han sido satisfactorios, lo que confirmó la factibilidad del modelo para su uso en futuros casos de estudios.

- **Díaz, R. y Ordinola, M. (2016).** “Influencia en la instalación del turbogenerador de 21.7 MW en la repotenciación de la Central de Generación de Agroindustrias San Jacinto S.A.A” Perú.

En el siguiente informe se presenta el comportamiento del turbogenerador de 21.7 MW en la repotenciación de la central de cogeneración de Agroindustrias San Jacinto S.A.A., mediante la factibilidad técnica y económica de la Central de cogeneración, del cual por finalidad de autoabastecerse en un 100% de energía eléctrica y vender exceso de energía generada al SEIN; teniendo en cuenta el Reglamento de cogeneración del Perú D.S N° 037-2006 EM, normativa que menciona las pautas para la calificación de estas centrales de cogeneración según el tipo de tecnología que tengan. También determinó los indicadores técnicos óptimos, obteniéndose 18.44 MW eléctricos en generación de potencia, flujos de calor suministrado igual a 133.94 MW térmicos y 71.3 MW térmicos.

### **1.3. Descripción del lugar donde se ha realizado el estudio**

#### **A. Datos de la empresa**

- **Denominación**

Razón Social : EMPRESA AGROINDUSTRIAL AGROLMOS S.A.C.

- **Ubicación Geográfica**

Su centro de operaciones del Ingenio está ubicado en LTE 16 Valle R. entre los valles de los ríos Cascajal y Olmos en el departamento de Lambayeque, provincia Lambayeque, Distrito de Olmos.

- **Actividad Económica y producción**

El ingenio azucarero Agrolmos S.A.C., tiene como principal actividad económica cultivar y procesar la caña de azúcar, produciendo azúcar y derivados de primera clase, de acorde con las normas establecidas en la certificación ISO 9001:2000.

#### **B. Descripción de la Empresa Agrolmos S.A.C.**

La planta Agrolmos, es una empresa que pertenece al grupo Gloria que viene operando desde el 2013 y produciendo desde inicios del 2017; contempla actividades agroindustriales con el objetivo de fabricar y comercializar azúcar a partir del cultivo de caña. Proyecta habilitar más de 13,500 hectáreas de caña de azúcar con riego tecnificado, su capacidad actual de molienda es de 5,600 toneladas diarias en una primera etapa, para producir 600 toneladas de azúcar rubia, destinada tanto al mercado interno como al exterior. En su segunda etapa la capacidad de molienda diaria alcanzaría las 10,000 toneladas de caña, para producir 1,071 toneladas de azúcar por día.

Agrolmos tiene como meta ser el más moderno y eficiente ingenio azucarero del país en operatividad tecnológica para este tipo de industria, con menos uso de agua en sus procesos productivos, autogenerando su propia energía, cuyos excedentes pueden ser comercializados a la red eléctrica, y con una tecnología que reemplazara a los tradicionales trapiches, para garantizar una mejor extracción de jugo de la caña y un alto rendimiento al final de proceso. Con el adecuado uso de tecnología los resultados en el manejo agronómico son altamente positivos.

#### **1.4. Justificación**

El trabajo de investigación tiene importancia desde su condición operativa, porque ha permitido obtener cuáles serían las más adecuadas para asegurar la eficiencia continua de planta, confiabilidad y calidad del vapor que se utiliza en el proceso de elaboración de azúcar, así como para las unidades de generación de energía, ya que se acciona turbinas y obtiene electricidad para los procesos de la planta.

La metodología de balance de energía permite identificar las irreversibilidades reales en cada etapa del proceso de operación de uso de energía del generador de vapor siendo posible evaluar la factibilidad de realizar mejoras desde los parámetros energéticos operativos e incluso para tomar decisiones en alguna mejora tecnológica.

El estudio se justifica porque inicialmente no se conoce la eficiencia de la planta, la eficiencia del uso de energía y así con el balance de energía podemos determinar la cobertura térmica y eléctrica actual de la empresa.

#### **1.5. Hipótesis de la Investigación:**

Nos proponemos la siguiente hipótesis.

El incremento de la potencia del turbogenerador mediante cogeneración en la empresa agroindustrial Agrolmos S.A.C, tiene un efecto en la cobertura de la demanda térmica y eléctrica en 100%.

## **1.6. Objetivos**

### **a. Objetivo General:**

- Evaluar el efecto de la potencia del turbogenerador para la cobertura de la demanda mediante cogeneración en la empresa Agroindustrial Agrolmos S.A.C.

### **b. Objetivos Específicos:**

- Realizar un balance de energía para determinar la cobertura de la demanda térmica y eléctrica actual de la empresa Agroindustrial Agrolmos S.A.C.
- Evaluar el uso eficiente de la energía térmica del generador de vapor de la empresa Agroindustrial Agrolmos S.A.C.
- Realizar los arreglos de cogeneración en función a la potencia del turbogenerador para cubrir la demanda total de la empresa Agroindustrial Agrolmos S.A.C.
- Evaluar parámetros de calificación para la venta de energía eléctrica.
- Evaluar la rentabilidad del proyecto.

## **1.7. Limitación de la Investigación:**

Al no tener libre acceso para modificar ningún elemento del sistema de operación de la planta agroindustrial Agrolmos S.A.C., esto conlleva a que el estudio que se realizó haya sido descriptiva mas no aplicativa.

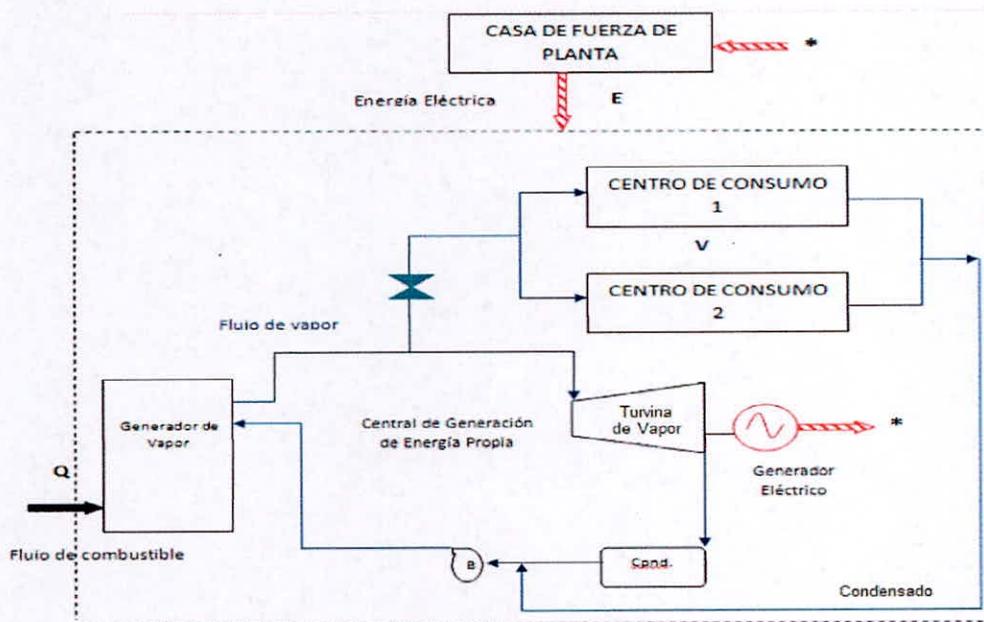
## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Plantas de Cogeneración

Cogeneración es la tecnología en el cual un centro de consumo genera simultáneamente de dos o más tipos de energía, normalmente las energías generadas son energía eléctrica y energía útil para su propio consumo a partir de una misma fuente de energía primaria.

La cogeneración es proceso energético de alta eficiencia, el cual permite obtener energía de alta calidad a bajo costo específico y elevados índices de ahorros energéticos, con disminución de gases de efecto invernadero.

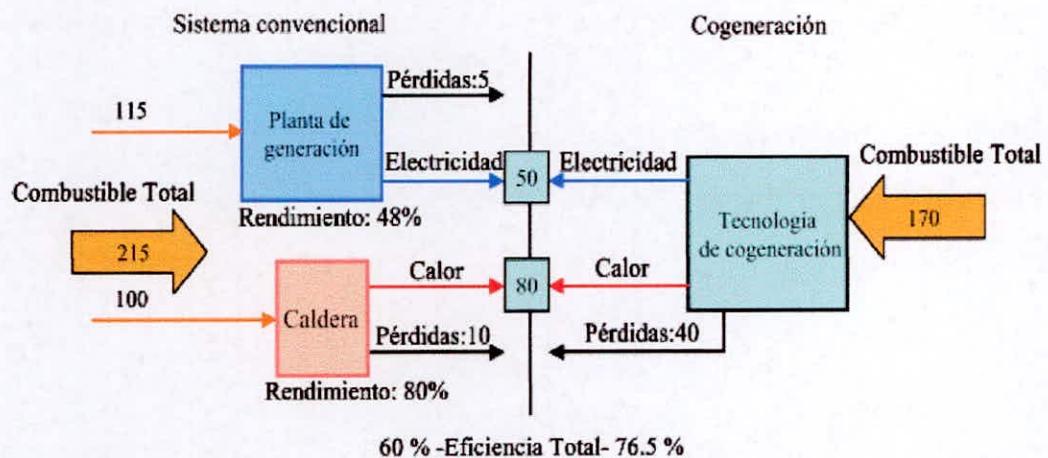
En este tipo de centrales se puede utilizar tecnologías de generación con turbinas de vapor, turbinas de gas, o con motores de combustión interna entre otras.



**FIGURA N° 1: Sistema de una planta de Cogeneración**

Fuente: Robert Guevara (Cogeneración de energía)

La eficiencia energética en la cogeneración es importante y contribuyente a la mitigación del cambio climático y al mismo tiempo, aporta a la reducción del costo energético ya que algunas plantas utilizan energía residual como combustible de la generación de potencia. La cogeneración es mucho más eficiente que la producción de electricidad y calor por separado, aportando en más del 30% a la eficiencia del sistema conjunto y disminuyendo el consumo de combustible a más del 50%. (Gonzales, 2012, p.22)



**FIGURA N° 2: Eficiencia y ahorro de energía prima**

**Fuente:** Fraile Chico (Cogeneración)

### A. Parámetros Característicos.

Tomando como referencia detallado en la figura N° 1, se define.

**Q** = Potencia térmica suministrada por el combustible en la cámara de combustión

**V** = Potencia térmica útil utilizado por los centros de consumo de planta.

**E** = Potencia eléctrica generada a través de la casa de fuerza de planta

**Relación de Cogeneración:** Es la relación entre la Potencia eléctrica generada por el generador eléctrico y la Potencia térmica útil aprovechada en los procesos térmicos dentro de las plantas consumidoras de energía. Un valor elevado de este parámetro, resultara un indicador de que es mayor la energía eléctrica sobre el consumo de energía térmica. (Haro y Crispin, 2015, p.16)

C = Relación de Cogeneración.

$$C = \frac{E}{V} \quad (2.1)$$

**Rendimiento Eléctrico Efectivo:** Este indicador es la inversa del rendimiento y compara la capacidad de generación de energía eléctrica con la diferencia entre el calor suministrado a la unidad de cogeneración con el calor suministrado para generar el calor útil por medio de un generador de vapor cuya eficiencia es la máxima posible, en este caso 90%. (Haro y Crispin, 2015, p.16)

$$REE = \frac{E}{Q \cdot \frac{V}{0.9}} \quad (2.2)$$

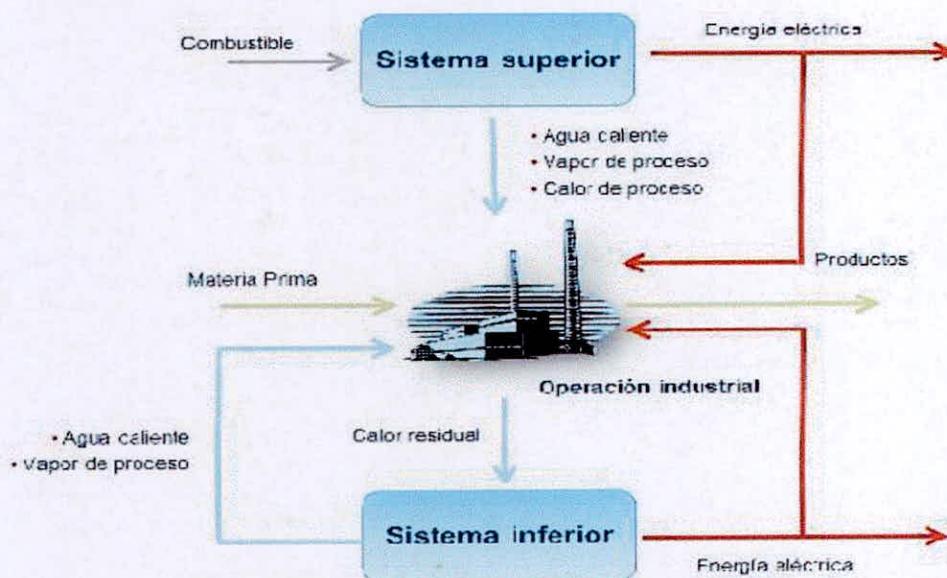
### 2.1.1 Arreglos de las Centrales de Cogeneración:

#### a. Ciclo de Superior o Topping Cycles.

Se caracterizan por que, en el primer escalón de generación de energía, se produce la energía eléctrica y con el calor residual se produce vapor saturado o se calienta un fluido térmico. Industrias que utilizan este tipo de sistemas, son las industrias textiles, empresas de harina de pescado, industrias de alimentos o bebidas, azucareras entre otras, donde sus requerimientos de calor son moderados o bajos entre 250°C a 600°C.

### b. Ciclo de Inferior o Bottoming Cycle.

Se caracterizan por que en el primer escalón de generación se produce calor útil el cual es utilizado en un segundo escalón para la generación de energía eléctrica. Este tipo de sistema es utilizado por empresas cementeras, metalúrgicas, refinerías, empresas de vidrio e industria química. En donde el calor residual esta entre los 800°C y °500.



**FIGURA N° 3: Sistemas de Arreglos en la Cogeneración**

**Fuente:** CONAE (México)

### Tipos de plantas de Generación de Energía:

- Cogeneración con motor a gas.
- Cogeneración con turbina de gas.
- Cogeneración con turbina de vapor.
- Cogeneración en ciclo combinado con turbina de gas y vapor.
- Cogeneración con motor a gas y turbina de Vapor.
- Plantas geotérmicas, nucleoelectricas entre otras.

## **2.2. Plantas Azucareras de Cogeneración.**

Generalmente las plantas agroindustriales tienen instalados turbogeneradores que utilizan el vapor producido en los generadores de vapor como fuente de acción mecánica para rotar un generador acoplado hacia la turbina y así producir la energía eléctrica que necesita el ingenio para sus procesos; algunos ingenios azucareros producen excedentes de energía eléctrica para poder venderlo a la red interconectada. (Rein, 2012, p.203)

Algunos ingenios azucareros peruanos, como Paramonga y Agroaurora vende energía eléctrica al SEIN, y San Jacinto también tiene ese objetivo planteado.

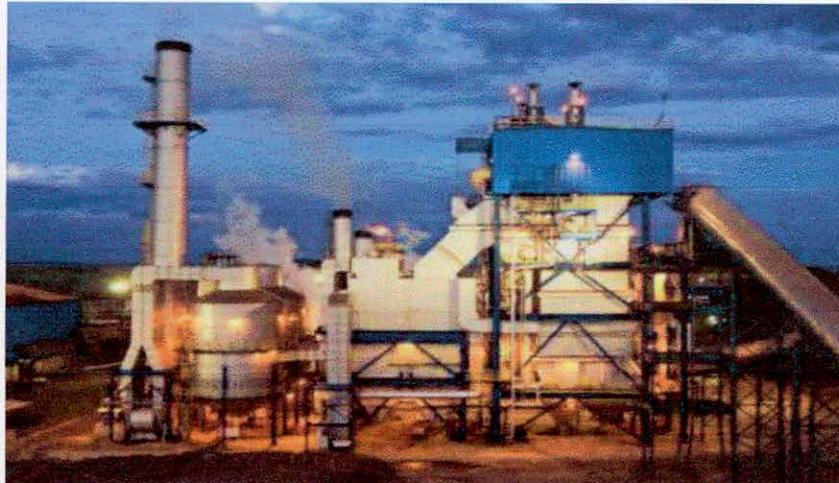
El bagazo es el subproducto que se aprovecha de la caña. La fibra leñosa de la caña almacena el jugo residual, y la humedad varía según el proceso de extracción. El Poder calorífico real del bagazo depende de la humedad, y la composición que tenga el bagazo, entre los más principales está el porcentaje de sacarosa y Pol. Esto varía según la eficiencia de extracción de jugo de la molienda.

### **2.2.1. Caldera Acuotubular Generadora de Vapor.**

La caldera es un sistema donde se genera vapor para procesos industriales, calefacción, para accionamiento mecánicos con turbinas de vapor y para generación de energía eléctrica. En términos generales se le considera a la caldera un generador de vapor. (Hugot, 1986, p.98)

La capacidad de generación de vapor de las calderas varía respecto a su potencia y su eficiencia, la calidad del bagazo y la capacidad de vapor que necesita el ingenio para sus procesos.

En el ingenio Agrolmos la demanda de vapor en el proceso es mayor que la producción de vapor de escape por medio del turbogenerador, por lo que se tiene instalado una serie de reductoras de presión donde ingresa vapor a alta presión de los generadores de vapor y es reducida hasta la presión de saturación necesaria para cubrir la demanda de vapor de proceso.



**Figura N° 4: Generador de vapor Acuotubular de Alta Presión**

Fuente: Ingenio Agrolmos

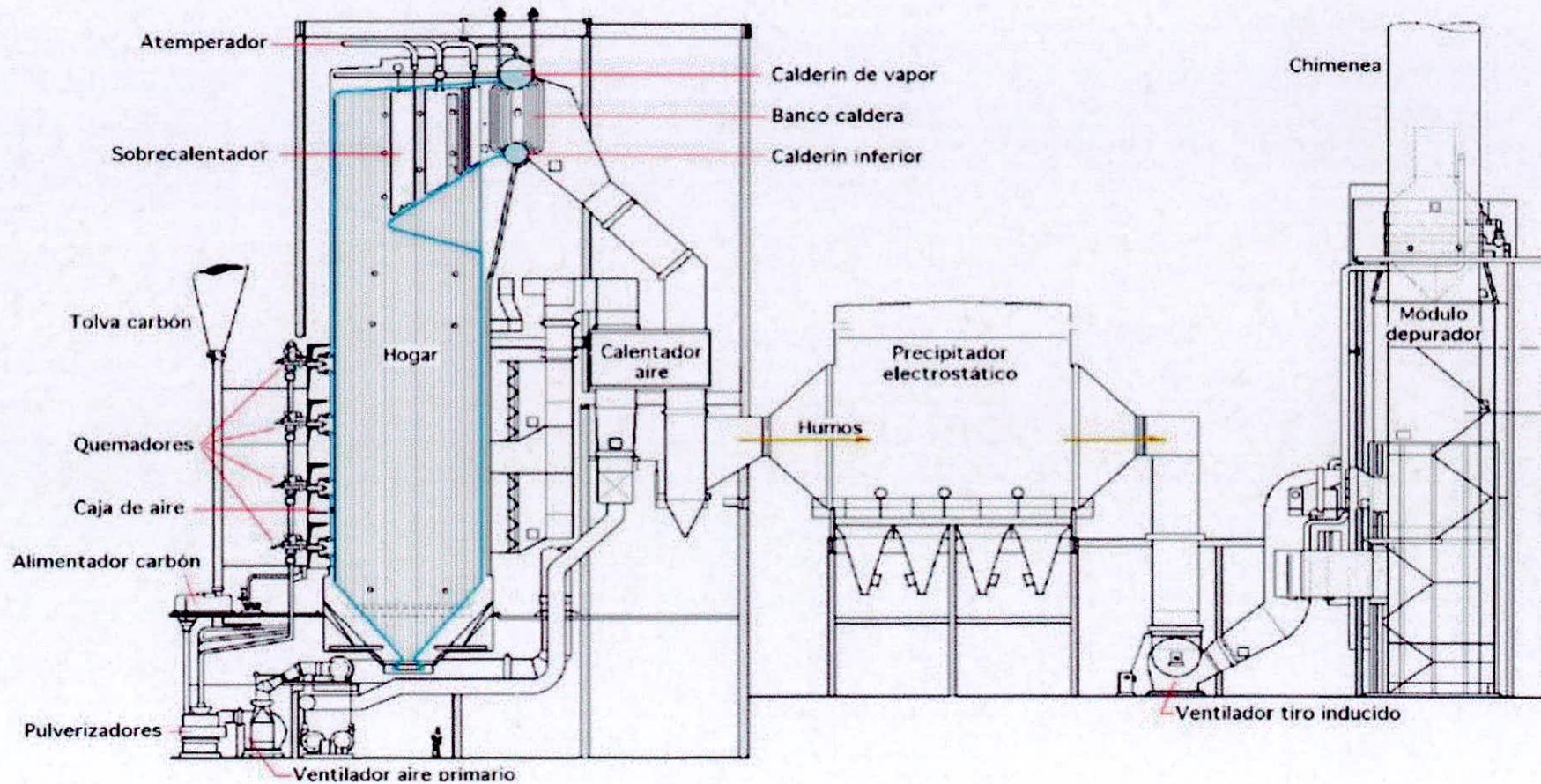
#### **Descripción del Generador de vapor del Ingenio Agrolmos**

- La caldera en el ingenio Agrolmos es Acuotubular y produce vapor para alimentación a una presión de 42 bar absoluto y 415°C aproximadamente.
- Actualmente el ingenio Agrolmos tiene un generador de vapor con una capacidad de 110 Ton/h.
- La alimentación del combustible es regulada con los alimentadores de bagazo, que es accionada por motores eléctricos controlados sistemas automáticos de PID.
- El agua de alimentación es calentada en un Desaireador elevando su temperatura hasta los 110°C utilizando una cantidad de vapor de escape, luego es bombeada e ingresa al economizador donde se eleva su temperatura, seguidamente es enviada hasta el domo superior. Luego el agua es enviada al domo inferior, donde se distribuye los colectores el cual se encarga de enviarlo a las paredes de la caldera donde se evapora, continuamente vuelve a subir al domo superior como vapor y por ultimo este pasa al sobrecalentado, done sale como vapor sobrecalentado para los procesos.

- En la combustión, el aire primario que es enviada por el motor primario se dirige hacia la zona inferior del hogar que se distribuye en las parrillas, y aire secundario que es enviado por el motor forzado se dirige al interior para controlar el fuego; cada flujo de aire antes de llegar al hogar pasa por calentador de aire. También se tiene un flujo de aire conocido como esparcidor de bagazo que ingresa a la caldera.
- Los gases de combustión antes de pasar por el precipitador son aprovechados y realizan la transferencia de calor en el economizador y los calentadores de aire reduciendo su temperatura hasta los 170°C.
- El generador de vapor de Agrolmos cuenta con un sistema de tecnología de Precipitador Electrostático donde atrapa los inquemados generados en la combustión. Y los gases purificados son expulsados a la atmosfera a 170°C, atreves de unos motores eléctricos inducidos.

#### **Accesorios de sistemas de control en la caldera.**

Los accesorios utilizados en la caldera son: sensores de presión, sensores de temperatura, sensores de nivel de agua, válvulas automáticas del agua de alimentación, válvulas de seguridad, válvulas de purga que trabajan con sistemas de lazos de control PID (Scada)



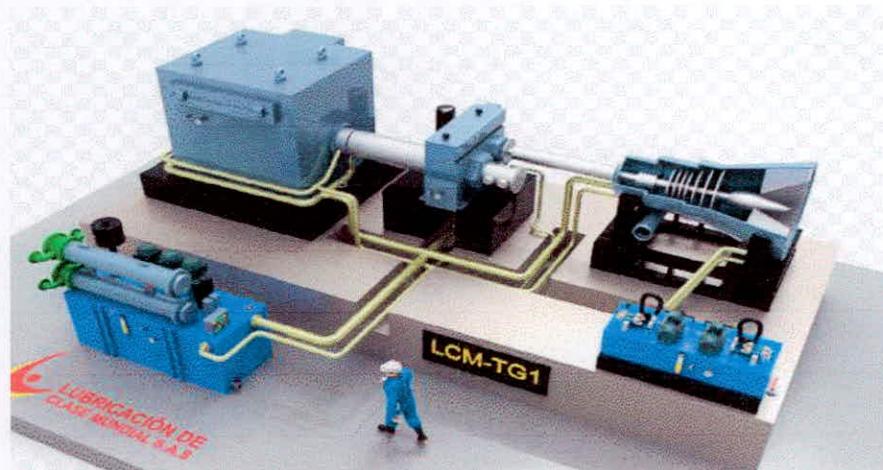
**Figura N° 5: Partes de un generador de vapor**  
**Fuente:** Hugot E. (Manual para Ingenios Azucareros)

## 2.2.2. Generación de electricidad

### 2.2.2.1. Turbogenerador Eléctrico.

El turbogenerador es un equipo utilizado para la transformación de Energía térmica de un fluido, en energía eléctrica de corriente alterna, está compuesto normalmente por una turbina de gas o de vapor acoplada a un generador eléctrico y excitatriz. Entre otros equipos auxiliares.

Los turbogeneradores fueron desarrollados para ser utilizados en Centrales Termoeléctricas.



**Figura N° 6: Sistema Turbogenerador**

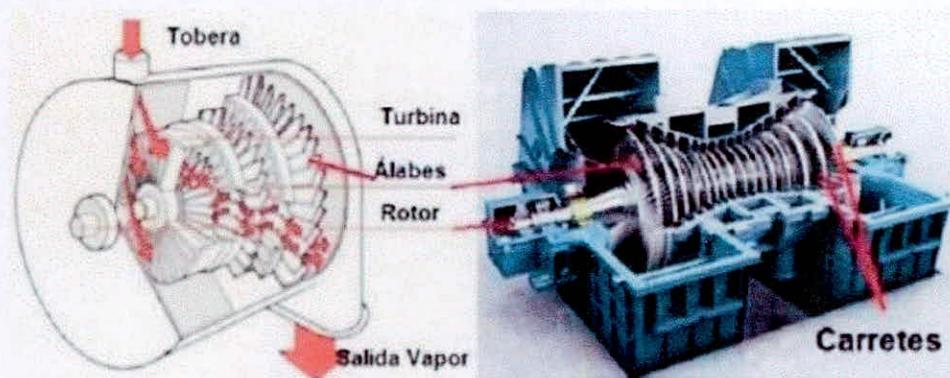
**Fuente:** Bermúdez V. (Tecnología energética)

### 2.2.2.2. Turbina de vapor.

Es un tipo de turbomáquina de motor que transforma la energía proveniente del flujo de vapor en energía mecánica. Las turbinas se pueden utilizar en diferentes ciclos de potencia que emplean un fluido que tiene la propiedad de cambiar de fase. El ciclo más usado es el que emplea vapor proveniente de un generador de vapor que sale con temperatura y presión elevadas. (Meza, 2014, p.112)

Las turbinas de vapor se emplean en muchas circunstancias, ya que son muy versátiles. En la industria, se usan para el funcionamiento de bombas y molinos, picadores, etc. Actualmente la aplicación más común y relevante es la de generar energía eléctrica.

Se estima que la turbina de vapor es utilizada en las plantas generadoras hasta en un 75% de la energía eléctrica producida a nivel mundial. Se emplea en centrales térmicas (gas, carbón, biomasa, etc.) y en centrales nucleares.



**Figura N° 7: Partes de una Turbina de Vapor**

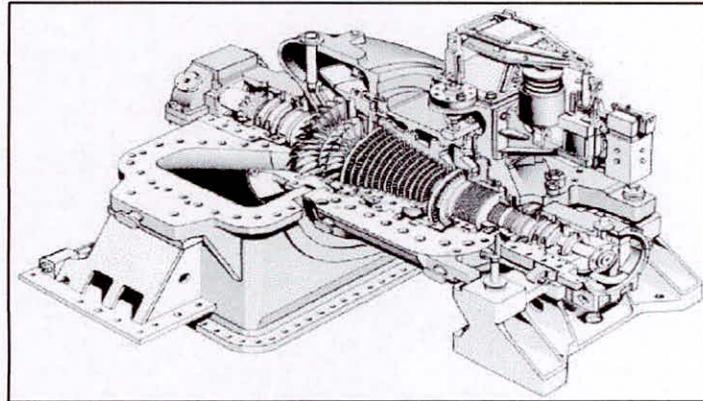
**Fuente:** Meza R. (Turbinas de vapor)

Las turbinas están clasificadas por aplicación:

- Accionamiento mecánico:
  - Bombas o sopladores
  - Sopladores
  - Compresores
  - Molinos, etc.
  
- Accionamiento eléctrico:
  - Generadores síncronos

**a. Turbinas de condensación.**

Son de gran tamaño, utilizadas en centrales térmicas. La presión de descarga puede ser inferior a la atmosférica debido a la condensación del vapor de salida.

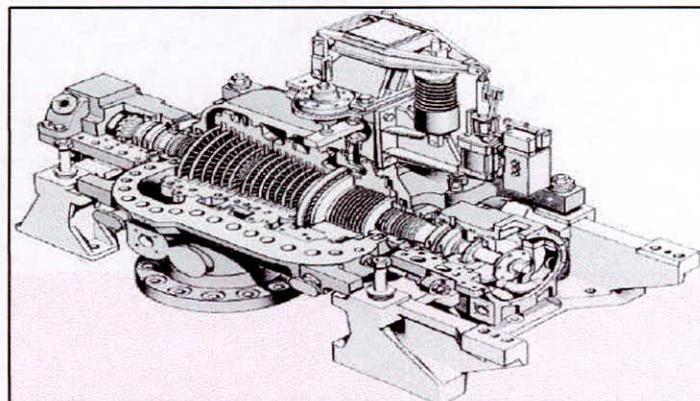


**Figura N° 8: Turbina de condensación.**

Fuente: Zafra y Cabellos. (Tesis)

**b. Turbinas de contrapresión.**

Se utilizan como expansoras para reducir la presión del vapor generado al mismo tiempo energía. Descargan el vapor a una presión aún elevada, para ser utilizado en procesos industriales.



**Figura N° 9: Turbina de contrapresión.**

Fuente: Zafra y Cabellos. (Tesis)

### **2.2.2.3. Generador Eléctrico.**

El generador eléctrico es el componente utilizado para la transformación de la energía mecánica de rotación de la turbina en energía eléctrica.

Los generadores son máquinas sincrónicas que se utilizan para generar corriente alterna a un voltaje y frecuencia específica, el término sincrónico se refiere a que la frecuencia eléctrica del generador está relacionada o sincronizada con la velocidad de rotación (revoluciones) de su eje. El principio básico de operación de los generadores sincrónicos, es que el movimiento relativo entre un conductor y un campo magnético induce un voltaje en el conductor.

Una fuente externa de energía de corriente directa o excitadora acoplada al mismo eje, es aplicada a través de unos anillos colectores en el rotor. La potencia eléctrica generada en el generador es controlada por un regulador de voltaje que trabaja enlazado con el regulador de velocidad de la turbina, para generar satisfacer la demanda requerida de energía eléctrica.

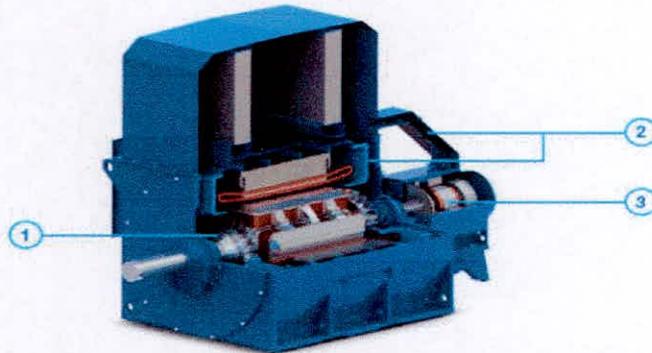
La corriente alterna se genera en la armadura debido a la inversión del campo magnético a medida que los polos sur y norte pasan por los conductores individuales.

#### **a. Excitatriz.**

El sistema excitatriz está acoplada al mismo eje del generador eléctrico. El objetivo del sistema es inyectar energía en forma de voltaje y corriente directa al campo generador, creando el campo magnético. De igual forma el sistema de excitación comprende el equipo de control y protección, que regula la producción eléctrica del generador. La energía de excitación se toma del conmutador en el rotor del generador y se aplica al campo rotatorio del generador principal a través de los anillos colectores.

El voltaje del generador se controla mediante un regulador, este varía la excitación de corriente en el estator del generador de corriente directa.

1. Mayor espaciamiento y aumento del flujo de aire en la cabeza de la bobina y de los cojinetes
2. Sistema de refrigeración por ductos más eficiente y optimizado
3. Integración del rectificador a la excitatriz aumentando la robustez del conjunto de excitación

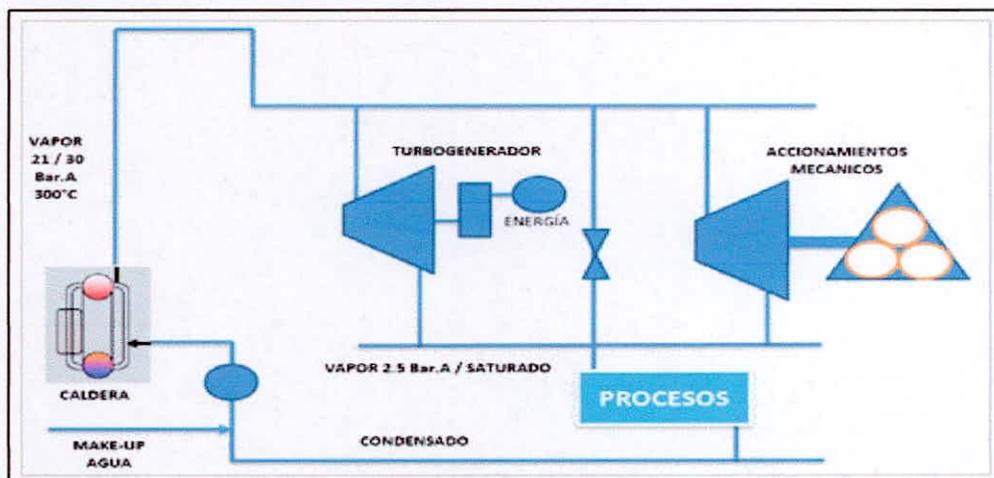


**Figura N° 10: Sistema Generador y Excitatriz**

Fuente: Meza R. (Turbinas de vapor)

### 2.3. Principales arreglos de Cogeneración en los ingenios azucareros.

- **Ingenio Azucarero Tradicional**



**Figura N° 11: Diagrama tradicional de un ingenio azucarero**

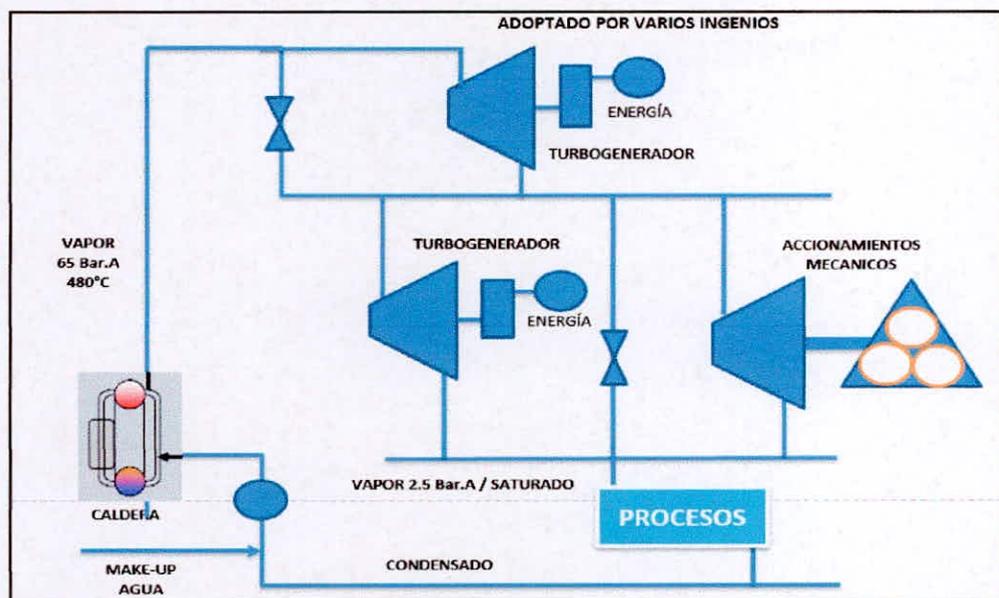
Fuente: Seminario sobre Eficiencia Energética - Siemens Mesoamérica.

Sistema utilizado por ingenios que aún no están enfocados en la generación de energía eléctrica.

En este sistema tradicional, se tienen las siguientes observaciones:

- El bagazo es muy húmedo, teniendo como resultado vapor de baja presión y temperatura, y una baja eficiencia de planta.
- Unidades de cogeneración con muy baja eficiencia.
- No cubren la demanda de energía eléctrica del ingenio y consumen energía externa.
- Demasiadas turbinas de vapor de accionamiento mecánicos.
- Uso de reductoras de presión, pérdidas de energía térmica.

- **Ingenio Azucarero Optimizado**



**Figura N° 12: Diagrama optimizado de un ingenio azucarero**

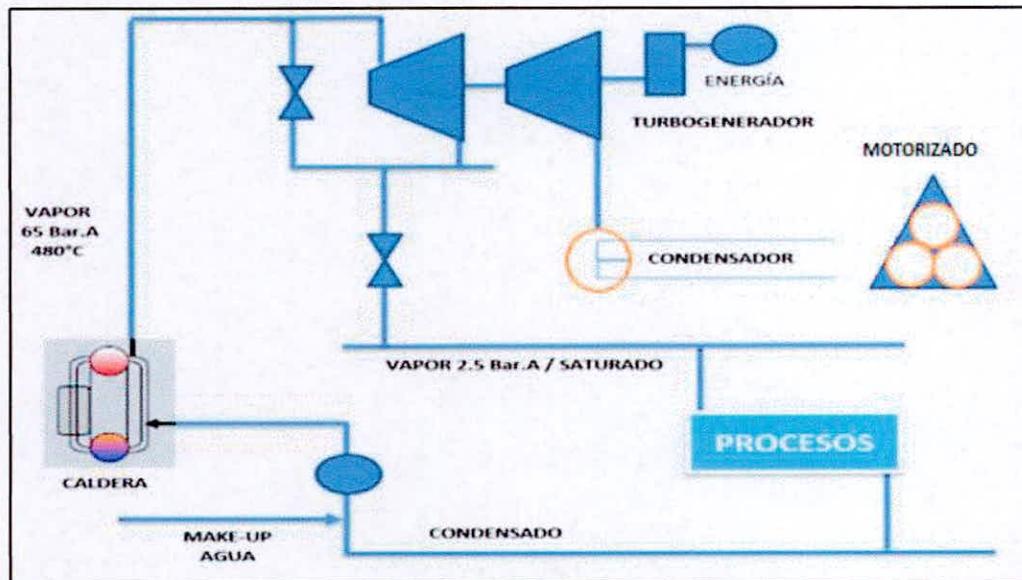
**Fuente:** Seminario sobre Eficiencia Energética - Siemens Mesoamérica.

Este sistema es utilizado por la mayoría de los ingenios.

Este sistema de operación tiene las siguientes observaciones:

- La Generación de energía más eficiente.
- Mejor relación presión y temperatura.
- Calderas de nueva generación con Eficiencia mediana.
- Ingenio aun con accionadores mecánicos con turbinas de vapor.
- Uso de reductoras de presión, perdidas de energía térmica.

- **Ingenios Azucarero Actual**



**Figura N° 13: Diagrama actual de un ingenio azucarero**

**Fuente:** Seminario sobre Eficiencia Energética - Siemens Mesoamérica.

Actualmente está siendo preferido por los ingenios.

En este sistema de operación, se tienen las siguientes observaciones:

- La generación de energía es uno de los principales enfoques del ingenio.
- Parámetros de alta presión y temperatura. Calderas con alta eficiencia.
- Reemplazo de turbinas de vapor pequeñas por motores eléctricos.

- Aumenta la eficiencia de la planta.
- La eficiencia es el objetivo común en todo el ingenio.
- Mejor humedad en el bagazo como combustible.
- Enfocado en equipos de alto comportamiento tecnológico.
- Migración a ciclo combinado.

#### 2.4. Procesos de Azúcar en un Ingenio azucarero

Generalmente los ingenios azucareros tienen el mismo proceso, pero con algunos arreglos en sus procesos y nuevas tecnologías implementadas, lo que diferencia unos de otros y mejora su eficiencia. El proceso principal consta de los siguientes pasos:

##### • Molienda

La caña que entra a la fábrica es pesada y sometida a un proceso de desfibrado de tallos, luego unas fajas transportadoras las conducen al sistema de difusor, donde se realiza la extracción de sacarosa con agua caliente.

El bagazo sale del último proceso de extracción y es llevado hacia las calderas donde será usado como combustible, o al depósito de bagazo, donde es vendido.

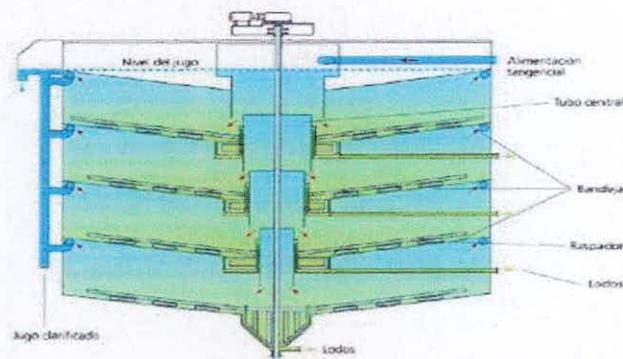


**Figura N° 14: Proceso de Molienda**

**Fuente:** Rein (Ingeniería de la caña de azúcar)

## Clarificación

El jugo proveniente del difusor y de los molinos secadores, es enviado a un tanque donde se le bajara su grado de acidez. El jugo es enviado a unos calentadores donde luego será enviado a un tanque flasheo abierto a la atmosfera, en el cual perderá temperatura. En los clarificadores se sedimenta y decanta los sólidos. Los sólidos decantados pasan a través de un sistema rotativo, donde retienen la cachaza que puede ser usada como abono.



**Figura N° 15: Sistema Clarificador**

Fuente: Sandoval (Tesis)

## Evaporación

Luego el jugo clarificado pasa al sistema evaporador, donde algunos funcionan al vacío para facilitar la ebullición a menor temperatura. En este paso se extrae un 75% del contenido de agua al jugo. Para obtener el jarabe o meladura.



**Figura N° 16: sistema de Evaporadores en Serie**

### • **Cristalización**

El cocimiento de la sacarosa que contiene el jarabe se lleva a cabo en los tachos al vacío, algunas empresas industriales de azúcar trabajan solo con Tachos Bath y otros con Tachos Batch y Continuos haciendo más eficiente y más productivo el segundo sistema. Estos cocimientos producirán los granos de azúcar para luego llevar un proceso de refinado. La cristalización del azúcar es un proceso que lleva tiempo, más aún cuando utilizas solo los tachos batch.

### • **Centrifugación y Refinado**

En este proceso se separa jarabe que aun contenga los granos de azúcar, utilizando agua en cantidades reguladas, normalmente se utiliza vapor. La masa cocida obtenida en el proceso de cristalización es llevada a maquinas giratorias llamadas centrifugas que tienen paredes laterales perforadas; forradas en el interior por una tela metálica, que giran entre 1000 y 1800 rpm. El licor es separado, y la miel que se extrae nuevamente inyectado en los procesos de cocimiento.

### • **Secado y Envasado**

El azúcar descargado de las centrifugas ingresa continuamente a un secador de tambor giratorio, el cual seca el grano el azúcar con aire caliente. Luego es llevado al área de envase, donde es envasado en sacos de polímero cosido y finalmente trasladado al área de producto terminado, donde se deberá controlar el peso de cada saco y la humedad.

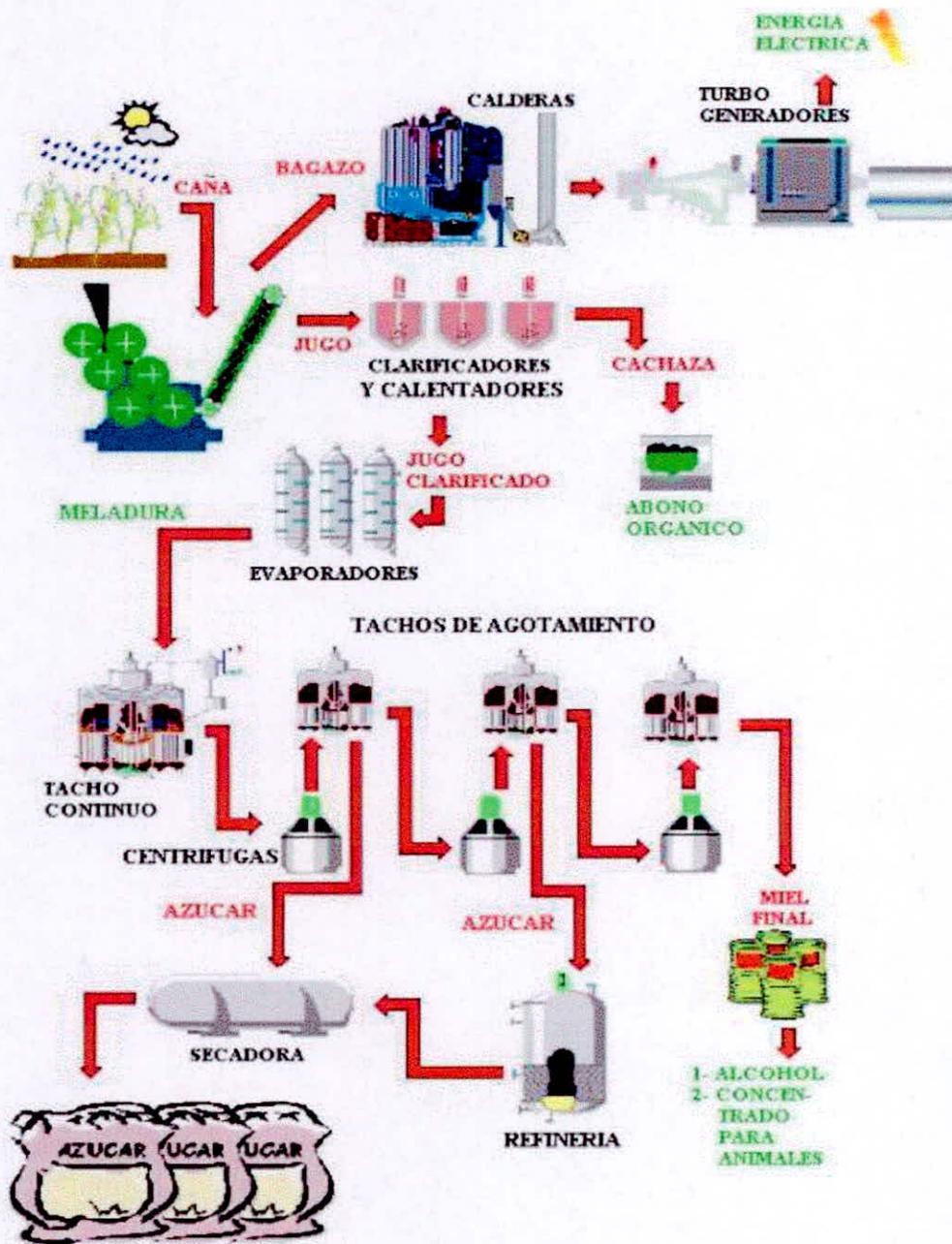
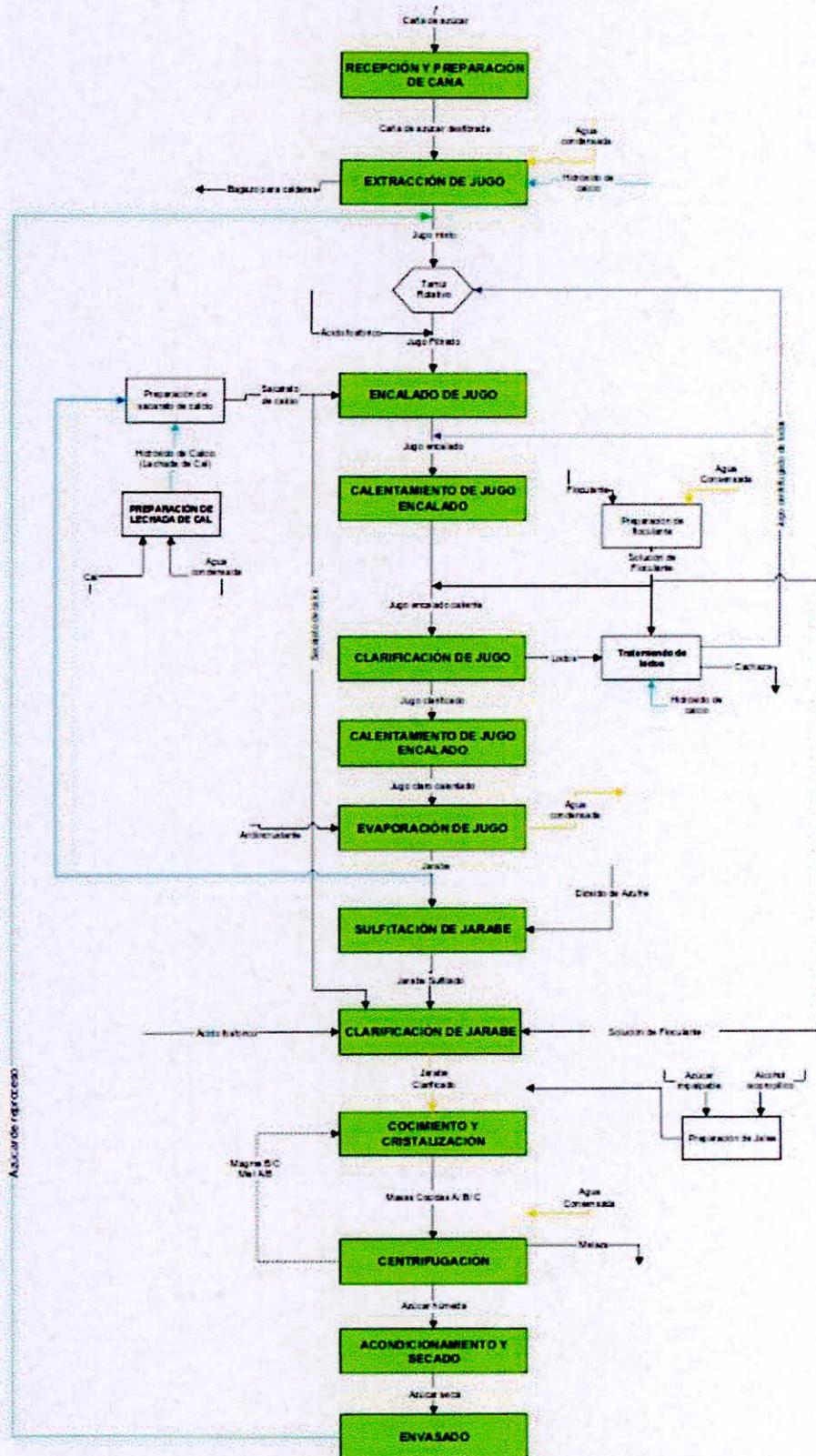


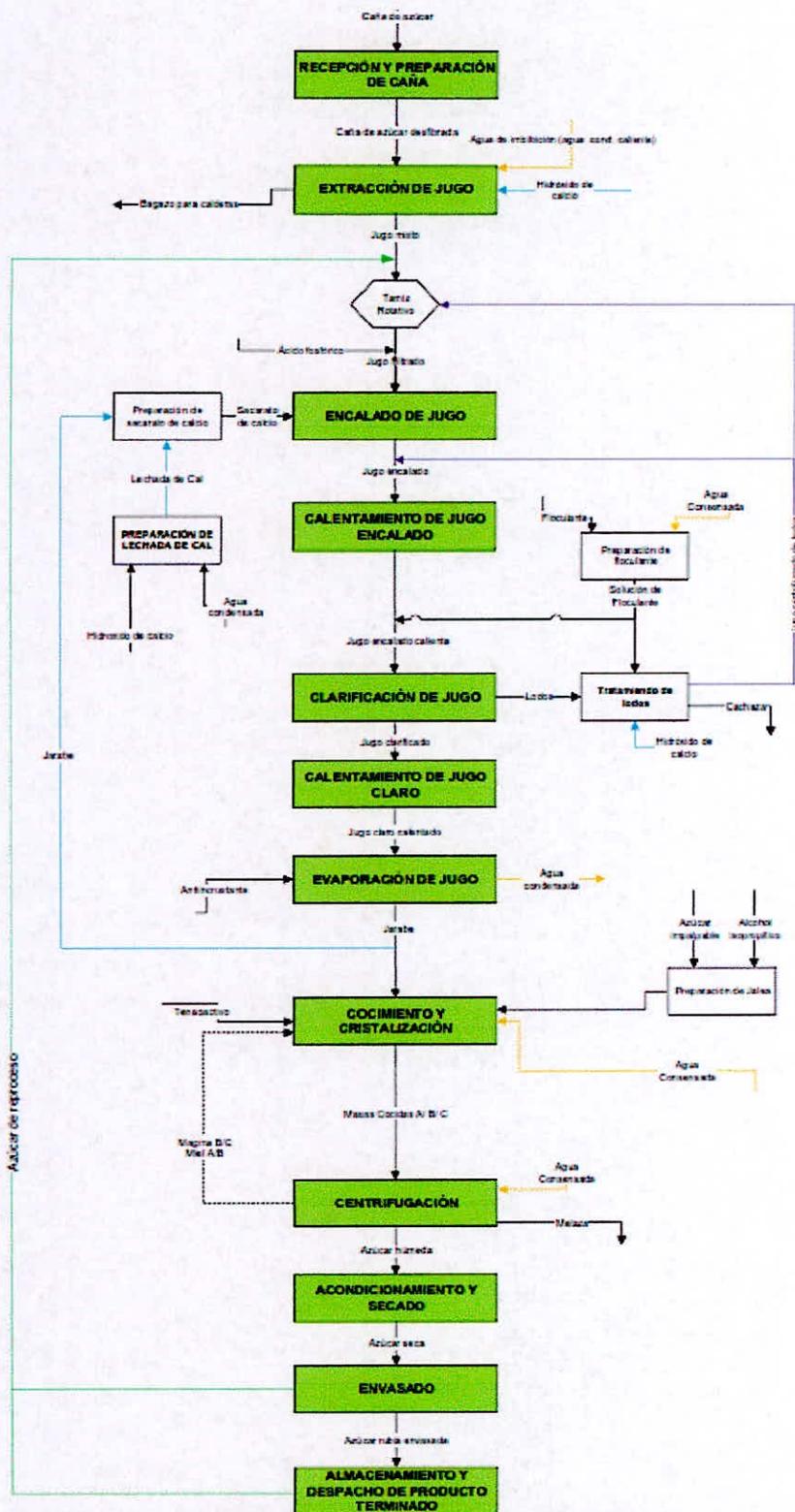
Figura N° 17: Procesos de una Planta Azucarera de Cogeneración

Fuente: Hugot (Manual para ingenieros azucareros)



**Figura N° 18: Diagrama de elaboración de azúcar blanca**

Fuente: Ingenio azucarero Agrolmos



**Figura N° 19: Diagrama de elaboración de Azúcar Rubia**

Fuente: Ingenio Azucarero Agrolmos

## **2.5. Consumo de Vapor para Movimientos Principales en el Ingenio Azucarero.**

### **a. Requerimientos de vapor en las Turbinas.**

Las turbinas de vapor son altos consumidores de vapor, para el accionamiento mecánico y accionamiento eléctrico, si se busca una alta eficiencia energética es considerable utilizar motores eléctricos para los movimientos mecánicos en vez de turbinas de vapor. Si se utilizan turbinas de vapor para movimientos principales en molinos, desfibradoras, cuchillas, bombas, etc. Será necesario consumir más vapor de alta presión. (Rein, 2012, p.148)

El uso de difusores en lugar de molinos reduce este requerimiento. La potencia instalada puede ser algo mayor, pero ahora el vapor puede ser enviado a los turbogeneradores y generar más energía eléctrica.

El ingenio Agrolmos utiliza turbinas de vapor de accionamiento eléctrico para su turbogenerador. Ya que el ingenio para su sistema de extracción utiliza su sistema de difusor, y motores eléctricos acoplados a molinos, para el proceso de la caña a bagazo.

### **b. Estación reductora de vapor**

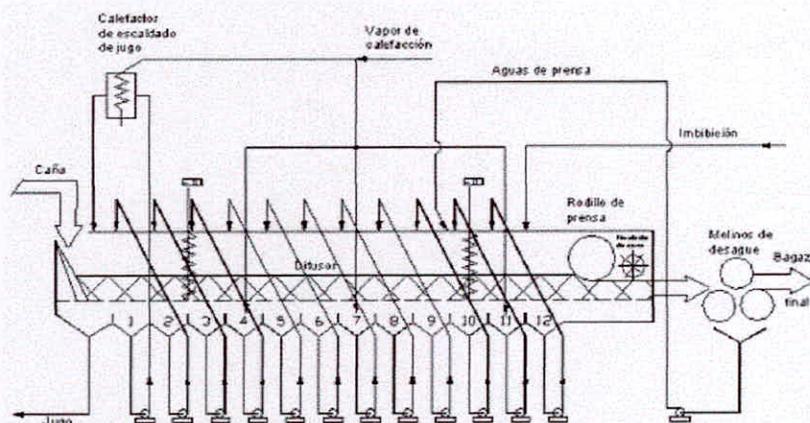
Cuando la demanda de vapor en el proceso es mayor que el vapor de escape que sale de la turbina, cierta cantidad vapor necesario de alta presión se envía a las reductoras y se reduce o lamina hasta la presión de escape. El vapor reducido debe ser además atemperado por lo que se le inyecta agua en spray mayormente del mismo Desaireador.

El vapor de escape ingresa generalmente en el primer efecto o conocido como evaporador de primer efecto, que llega a ser un intercambiador de calor indirecto sin contacto, donde se requiere vapor saturado para máxima transferencia de calor y evaporar agua del jugo.

## 2.6. Requerimiento de vapor para principales procesos de azúcar

### 2.6.1. Calentamiento en el difusor

La mejor fuente de agua para uso de la imbibición es el condensado a una temperatura tan alta como sea posible. En los difusores se inyecta imbibición hasta 85 °C y se le inyecta vapor de igual manera para mantener la temperatura interior elevada, normalmente se mantiene temperaturas cercanas a 80 °C. Al inyectar vapor y agua de imbibición, ayuda a mantener un rango mínimo en la Pol de bagazo, lo cual será necesario para protección al sistema de calderas.



**FIGURA N° 20: Sistema Difusor para Extracción de Sacarosa**

Fuente: Rein (Ingeniería de la caña de azúcar)

### 2.6.2. Calentamiento de jugo y jarabe

Un calentador de jugo está formado un intercambiador de carcaza y tubo. El jugo circula dentro de los tubos y el vapor alrededor de ellos es decir la carcasa. El intercambiador de calor tiene cierto número de pasos lo que hace que el jugo pase cierto número de veces de arriba hacia abajo y de abajo hacia arriba, cada vez por una parte de los tubos del intercambiador.

Normalmente el jugo se calienta en dos o más etapas, usando vapor a menor presión en la primera etapa para tener mejor economía de vapor.

También están los calentadores de contacto los cuales son más eficientes y aprovechan mejor el vapor, a la vez son menos costosos por su mantenimiento de trabajo constante ya que tiene una autolimpieza al momento de calentar algún flujo. Actualmente es más utilizado en las industrias.



**Figura N° 21: Calentador Carcaza/Tubo y Calentador de contacto Directo**

**Fuente:** Ingenio azucarero Agrolmos S.A.C.

### **2.6.3. Evaporadores**

El evaporador de una planta industrial está constituido especialmente por una calandria tubular que cumple con la función de intercambiar temperatura. El vapor de calentamiento rodea los tubos por el exterior y el jugo por evaporar pasa en el interior de esos tubos.

En el Ingenio Agrolmos el vapor de escape que se suministra a los evaporadores es de 2.5 Bares absolutos y cuenta con una serie de 5 evaporadores de película descendente.

#### **I. Principio de Riilleux**

La evaporación con diversos efectos fue impulsada por Nobert Riilleux en Luisiana. Esta tecnología ha sido significativa en la industria que involucran procesos de evaporación. En la industria azucarera Nobert

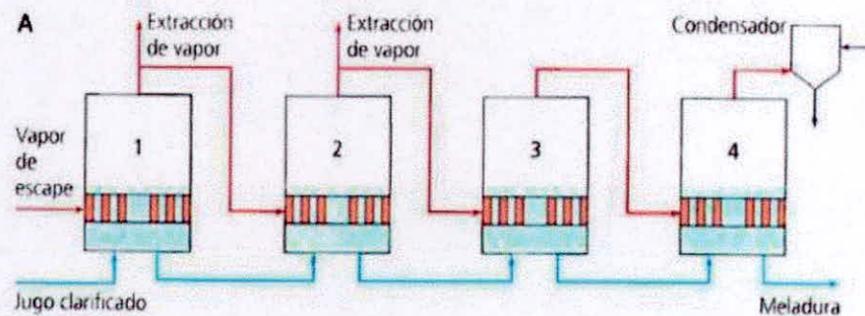
Riileux desarrollo reglas generales para el diseño y funcionamiento de los sistemas de evaporación. (Sandoval, 2013, p.81)

1. En un evaporador, un kg de vapor evaporara un Kg de agua. Por consiguiente, en un sistema de evaporadores de dos efectos, un kg de vapor evaporara dos kg de agua; en uno de tres efectos, tres kg de agua etc.
2. En cualquier sistema donde se condense vapor ose realicen extracciones de vapor, se necesitan realizar arreglos que liberen constantemente los gases incondensables.

Generalmente los ingenios de azúcar cuentan con una serie de evaporadores que tienen entre 3 a 5 efectos, dependiendo del tipo de proceso que realicen. Los dos últimos evaporadores trabajan en vacío, por la caída de presión y temperatura

#### **2.6.4. Extracciones de vapor**

A medida que incrementa el número de efectos desde donde se extrae vapor para los procesos, la temperatura de la extracción es menor. En consecuencia para optimizar la economía de vapor, se prefiere efectuar las extracciones desde todos los evaporadores, así el vapor 1 (V1) es utilizado generalmente en los tachos de masa principal y en los calentadores de jugo; el vapor 2 (V2) se usa tachos de masa secundaria y otros calentamientos de jugos; el vapor 3 (V3) se usa en tachos de masa tercera, en el difusor y calentamientos de primera etapa de jugo, el vapor 4 (V4) igualmente en calentamientos de jugo o jarabe y por último el vapor 5 (V5) será condensado y utilizado como agua de imbibición o dependiendo del diseño de trabajo del ingenio.



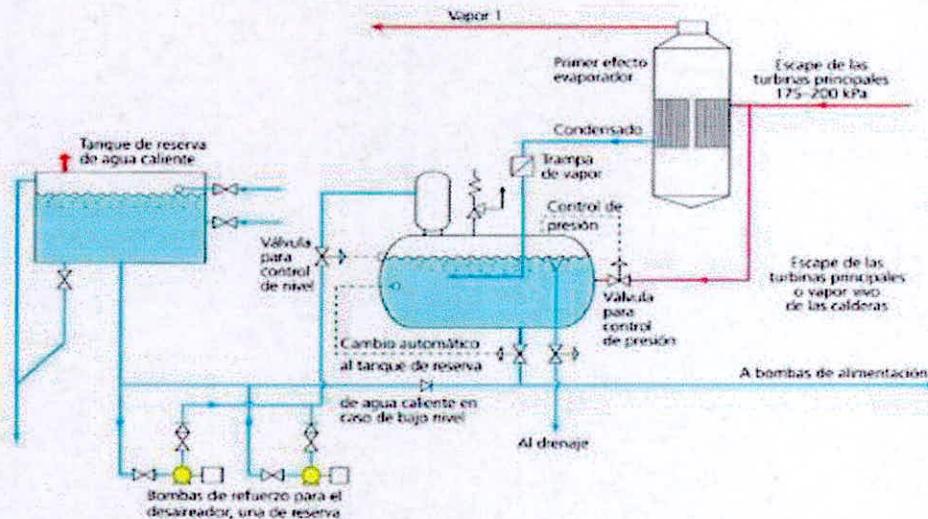
**FIGURA N° 22: Arreglo de evaporadores de 04 efectos en serie**

### 2.6.5. Requerimiento de Vapor en tachos Batch y Tachos Continuos

Normalmente el consumo de vapor en los tachos para su cocimiento depende del esquema que utiliza el ingenio, para un mínimo consumo de vapor, un menor tiempo del proceso y una alta eficiencia en la formación de los granos de azúcar. Para un esquema de cocimiento dado, el uso de vapor se determina por la razón de solidos disueltos o Brix en tachos.

### 2.6.6. Consumo de vapor en el Desaireador

El vapor que ingresa al primer efecto en el sistema de evaporación sale como vapor condensado el cual es enviado al Desaireador, donde también ingresa agua de alimentación o reposición para los generadores de vapor, resulta que tal combinación contiene oxígeno. La solubilidad del oxígeno, el aire y el dióxido de carbono en el agua varían en función de la temperatura del agua. Los desaireadores utilizan vapor de escape para eliminar el oxígeno. Los desaireadores cuenta también con mecanismos, tales como bandejas o aspersores, para exponer la mayor superficie posible de agua al vapor.



**FIGURA N° 23: Sistema Desaireador**

**Fuente: Sandoval (Tesis)**

### 2.6.7. Pérdidas de vapor

Normalmente siempre hay pérdidas de energía que se traducirán en el uso del vapor. Pérdidas de calor hacia el ambiente, fugas, purgas y venteos ocasionales, debidos mayormente a las operaciones de la industria. Se tienen pérdidas en las líneas de vapor y una pérdida promedio de aproximadamente 3%, es razonable en fábricas de alta eficiencia.

## **2.7. Calificación de las Centrales de Cogeneración para Venta de energía**

La cogeneración consiste en utilizar todo vapor de alta presión que pueda ser producido y maximizar la generación de energía en turbogeneradores eficientes. Normalmente el vapor de inyección al escape debería ser a través de turbinas generadoras, y en caso de generarse un excedente con respecto a las necesidades de la fábrica, deberá utilizarse una turbina de condensación para maximizar la producción de energía. (Sandoval, 2013, p.58)

El control de la presión de escape se alcanzará controlando el flujo hacia las turbinas generadoras para mantener constante el rango de presión de escape, o en el caso de turbinas de condensación, controlando la salida hacia el rango de escape. La forma más eficiente de incrementar la cantidad de energía es a través del uso de generadores desde vapor de alta.

### **2.7.1. Reglamento de la cogeneración**

Según el decreto supremo 037 – 2006 – EM, se promueve la tecnología de Cogeneración en el Perú con el objetivo de promover el desarrollo de una tecnología que mejora la eficiencia energética eléctrica y de calor útil. (Ministerio de energía y minas – Reglamento de cogeneración del Perú y sus modificaciones, 2006, p.1)

Para calificar (autorización para inyectar excedentes de energía eléctrica a la red), se debe requerir cumplir con el artículo N°4 y N°5.

#### **A. Solicitud de Calificación (Artículo N°4 del Reglamento de Cogeneración)**

Para obtener la calidad de Central de Cogeneración Calificada, el titular de la central de cogeneración debe presentar una solicitud de Calificación a la Dirección, acompañando lo siguiente: (Ministerio de energía y minas – Reglamento de cogeneración del Perú y sus modificaciones, 2006, p.3)

1. Informe técnico que sustente el cumplimiento de los valores mínimos al se refiere el Artículo 5°, basándose en las características técnicas de los equipos y en el planeamiento anual de operación de la central de cogeneración.
2. Balance energético sustentado de la central para las condiciones de operación en su máxima capacidad de cogeneración, indicándose la potencia eléctrica total a ser generada, la potencia mecánica, la potencia térmica utilizable y la potencia suministrada por el combustible, todos expresados en MW; incluyendo un diagrama de Sankey que indique los respectivos flujos de energía.
3. Memoria descriptiva de las instalaciones de la central, incluyendo diagramas y planos explicativos.
4. Actividad productiva a la que se destina el Calor Útil.
5. Potencia y energía eléctrica que se proyecta producir anualmente, y el desagregado entre la parte que será destinado al Autoconsumo y la que será entregada al Sistema Eléctrico.
6. Autorización de generación, cuando la potencia instalada sea superior a 500 kW. De existir deficiencias o si se hubiese omitido información, la Dirección observará la solicitud y notificará al solicitante para que la subsane dentro del plazo de quince (15) días hábiles de notificado, bajo apercibimiento de declarar improcedente la solicitud. La Dirección se pronunciará sobre la solicitud de Calificación de la central de cogeneración dentro del plazo de treinta (30) días hábiles desde la fecha de presentación. Vencido dicho plazo sin pronunciamiento alguno, se entenderá aprobada la solicitud. La Calificación deberá ser otorgada mediante Resolución Directoral de la Dirección General de Electricidad, la que será publicada por cuenta del Cogenerador. La Calificación entrará en vigencia a partir del día siguiente de su publicación en el Diario Oficial El Peruano. El plazo otorgado para subsanar observaciones, no será computado para los efectos del plazo señalado en el párrafo anterior.

## B. Criterios de Calificación (Artículo N°5 del Reglamento de Cogeneración)

Para efectos de la calificación, los titulares de las centrales de cogeneración deberán acreditar valores mínimos de REE, según combustible y tecnología. Tratándose de centrales de cogeneración que utilicen como combustible el gas natural, además acreditar valores de relación entre Energía Eléctrica y Calor Útil (C) iguales o superiores a los indicadores en el cuadro siguiente en función a la 2.1 y 2.2 del presente capítulo. (Ministerio de energía y minas – Reglamento de cogeneración del Perú y sus modificaciones, 2006, p.4)

**TABLA N° 1: Parámetros de Calificación**

| Tecnología / Combustible              | Rendimiento Electrico Efectivo (REE) | Relacion de Cogeneracion C=E/V |
|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| Turbina de Vapor de Contrapresion     | 0.7                                  | 0.15                           |
| Turbina de Vapor de Extraccion Simple | 0.68                                 | 0.3                            |
| Turbina de Gas de Ciclo Simple        | 0.55                                 | 0.4                            |
| Turbina de Gas de Ciclo Combinado     | 0.55                                 | 0.5                            |
| Motores de Combustion Interna         | 0.55                                 | 0.6                            |
| Biomasa                               | 0.3                                  |                                |

**Fuente: DS N° 037-2006 EM**

Se entenderá por biomasa la fracción de los productos, subproductos y residuos agrícolas (incluidas sustancias de origen vegetal y de origen animal), forestales, así como residuos industriales y municipales. Para aquellas centrales de cogeneración cuya potencia instalada sea menor a 3 MW, el REE mínimo requerido será en un diez por ciento (10%) menor al que se indica en el cuadro anterior, según corresponda.

La determinación del REE se efectuará para las condiciones de operación en su máxima capacidad de cogeneración durante dos horas de operación continua.

### **3. MATERIALES Y METODO**

#### **3.1. Materiales**

##### **a) Sustancias.**

- Bagazo: El Bagazo es la materia prima que se obtiene de la caña de azúcar que es utilizado como fuente principal de combustible para la generación de energía, la cual es utilizada con una humedad de 46% a 50%.

##### **b) Equipos.**

Se utilizaron los siguientes equipos

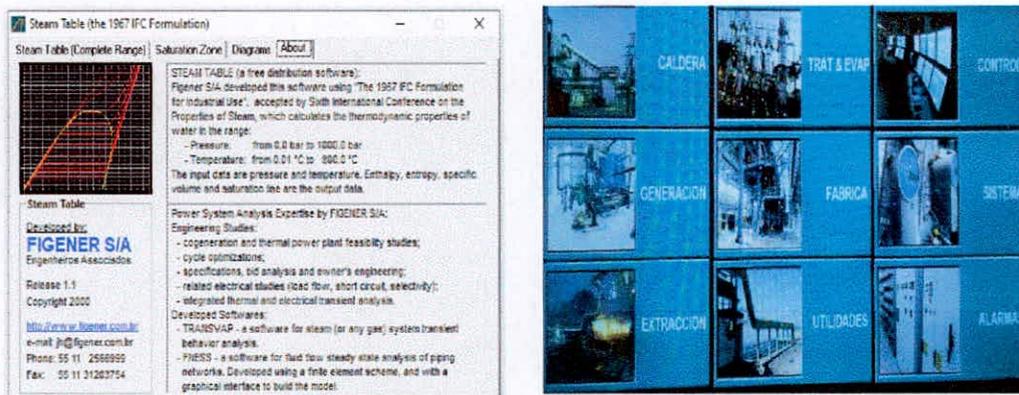
- Caldera – Generador de Vapor, Marca: MITRE
- Turbogenerador – Generador de Energía Eléctrica, Marca: TGM
- Difusor, Marca: Fives Cail
- Calentadores de Contacto Directo DCH, Marca: Fives Cail
- Calentadores Carcaza – Tubo, Marca: Fives Cail
- Evaporadores, Marca: Fives Cail
- Condensadores, Marca: Fives Cail
- Tachos Batch, Marca: Fives Cail
- Tachos Continuos, Marca: Fives Cail
- Desaireador
- Atemperadores
- Reductoras de presión

##### **c) Datos, Indicadores y Reportes**

- Los datos específicos de fabricación son tomados de cada equipo, los cuales serán necesarios para realizar los cálculos y balances.
- Esta información de indicadores y reportes es recopilada del año 2018 y 2019, los cuales son tomamos en cada proceso del ingenio.

#### d) Programas y Software

- Software de Figener – Diagrama de Mollier: Software para determinar las propiedades termodinámicas del agua. El software se basa a una tabla de vapor que proporciona datos de entalpia, entropía, volúmenes específicos, calidad del flujo entre otras, después de haber insertado la temperatura y presión en un intervalo, bien sea vapor sobrecalentado, vapor saturado o liquido comprimido.
- Software Scada: Permite controlar y supervisar procesos industriales a distancia. Facilita retroalimentación en tiempo real con los dispositivos de campo (sensores y actuadores), y controla el proceso automáticamente. Provee de toda la información que se genera en el proceso productivo (supervisión, control calidad, control de producción, almacenamiento de datos, etc.) y permite su gestión e intervención.



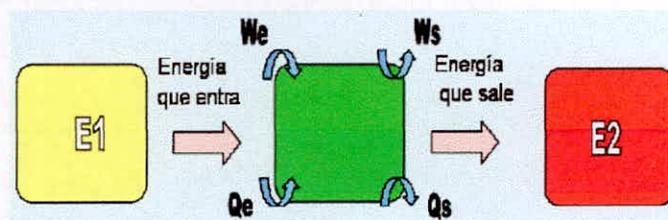
**FIGURA N° 24: Software Figener y Software Scada**

### 3.2. Método de Investigación

Se ha utilizado la siguiente metodología.

#### 3.2.1. Metodología de Balance de Energía

El balance de energía en una planta azucarera de cogeneración resulta favorable para fundamentar las transformaciones de energía que se producen durante un proceso industrial, o bien para determinar los requerimientos energéticos de una determinada operación o proceso industrial.



**FIGURA N° 25: Balance de Energía**

Se realizaron las siguientes actividades:

- Se realizó un balance de masa para identificar cuanto es la materia prima que se obtiene de la caña para la elaboración de azúcar, y así conocer con que cantidad de bagazo contaremos para ser usado como combustible.
- De acuerdo a la materia prima obtenida para la elaboración de azúcar se realizó balances de consumo de vapor en cada equipo térmico. En estos equipos se realizan los procesos por los cual pasa la materia prima para obtener el azúcar. Al mismo tiempo encontramos que el consumo de vapor es independiente en cada uno de ellos.
- La suma de todos los consumos de vapor en cada equipo térmico es el vapor total que genera el sistema de evaporadores, para lo cual se realiza un balance en los evaporadores en serie, el cual viene a ser el vapor total de escape que consume el primer evaporador; tal vapor de escape es administrado por las reductoras de presión de vapor y el turbogenerador; también tales equipos son alimentados por el generador de vapor (Caldera Acuotubular).

- d. Obtenido el vapor de escape que se utiliza en el primer evaporador, se realiza un balance en el generador de vapor (Caldera Acuotubular) para saber si puede cubrir la demanda térmica total de planta para sus procesos.
- e. Luego se realizó un balance en el Turbogenerador para estimar cuánto es su demanda térmica consumida y conocer la potencia eléctrica generada. Se realizó un balance de consumo de energía eléctrica para saber si el turbogenerador puede cubrir la demanda eléctrica total de planta para sus procesos.
- f. Una vez conocido la demanda térmica y eléctrica generada total de planta, realizamos un análisis para ver en qué parte del proceso de planta existe un déficit en el uso de la energía generada, y así determinar los arreglos de cogeneración en función a la potencia del nuevo turbogenerador.
- g. Con los arreglos de cogeneración, Se realizó un balance en el generador de vapor a su máxima capacidad, para estimar cuánto es la máxima potencia del nuevo turbogenerador.

### **3.2.2. Determinación de Variables, Indicadores y Costos**

Se determinaron las variable e indicadores de pérdidas y eficiencia de planta, donde indican el estado inicial y con los nuevos arreglos de cogeneración aplicados se obtiene los nuevos valores. También se realizó un estudio de calificación de venta energía eléctrica con los nuevos arreglos de cogeneración.

Se aplicó un programa de mantenimientos, costos y excedentes de venta de energía actuales y futuros, y por último se realizó el estudio de rentabilidad de proyecto.

### **3.3. Aplicación de Metodología**

**Para el balance de Energía en el Ingenio Azucarero Agrolmos Consideraremos lo siguiente:**

- El cálculo se realizará para una molienda efectiva de 5600 TCD, lo que posteriormente se llevará a cabo para calcular los flujos de jugo de caña, así también se podrá estimar los consumos de vapor en cada equipo térmico.
- Las presiones son calculadas en Bares absolutos “Bar@” y las pérdidas de energía en las líneas de vapor será considerable asumiéndole un valor entre 1-3%, es razonable en el balance.
- Las horas efectivas de molienda serán 23 horas y 24 horas por día en procesos térmicos, este valor se asume para los cálculos de operación.
- Los datos de medición de Brix de jugo colado, Brix de jugo claro, Brix de jarabe, etc. Son los promedios del 2018, y datos reales de elaboración y de medición del sistema de SCADA actualmente.
- Los balances de masas y energías se realizarán en los siguientes equipos térmicos: Difusor, calentador jugo mixto, calentador jugo colado, calentador jugo claro, calentador jarabe crudo, tachos Batch y continuos, Sistema de evaporadores, Turbogenerador y Generador de Vapor. Según lo indicado en el anexo N° 1.
- Los datos de generación de vapor, generación de energía eléctrica y consumos están tomados de los reportes actuales de cada Departamento.

Las fórmulas utilizadas son recopiladas de los libros azucareros reconocidos mundialmente, “Ingeniería de la Caña de Azúcar” de Peter Rain, y Manual para ingenieros Azucareros” de Hugot.

### 3.3.1. Consumo de vapor en turbinas

Las turbinas de vapor son las más grandes consumidoras de vapor.

#### A. Cálculo de consumo de vapor en la turbina:

$$\dot{m} = \frac{P_{tv}}{h_1 - h_{2'}} \quad (3.1)$$

Donde:

$\dot{m}$ : Consumo de vapor en la turbina Tn/h

$P_{tv}$ : Potencia consumida en la turbina, kW

$h_1$ : entalpia de entrada a la turbina. kJ/kg

$h_{2'}$ : entalpia real de salida de la turbina, kJ/kg

#### a. Entalpia real a la salida de turbina

$$h_{2'} = h_1 - \eta_T(h_1 - h_2) \quad (3.2)$$

Donde:

$h_{2'}$ : Entalpia real de la salida de la turbina. kJ/kg

$h_1$ : Entalpia de entrada a la turbina. kJ/kg

$\eta_T$ : Eficiencia de la turbina.

$h_2$ : Entalpia aparente a la salida de la turbina. kJ/kg

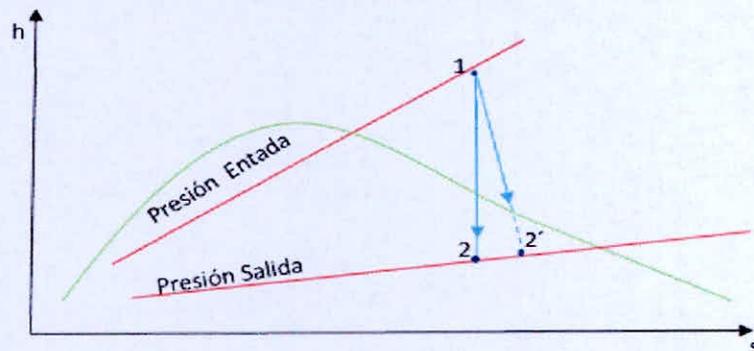


FIGURA N° 26: Diagrama de Entalpia vs Entropía

### **b. Entalpia Aparente a la salida de la turbina**

$$h_2 = h_{f2} - x \cdot h_{fg2} \quad (3.3)$$

**Donde:**

$h_{f2}$ : Entalpia de líquido saturado a la presión de salida de la turbina, kJ/kg

$h_{fg2}$ : Entalpia de vaporización a la presión de salida de la turbina, kJ/kg

$x$ : Calidad del vapor a la salida de la turbina

### **c. Calidad del vapor**

$$x = \frac{s_2 - s_{f2}}{s_{fg2}} \quad (3.4)$$

**Donde:**

$s_2$ : Entropía a la salida de la turbina, kJ/kg°C

$s_{f2}$ : Entropía de líquido saturado a la presión de salida de la turbina, kJ/kg°C

$s_{fg2}$ : Entropía de vaporización a la presión de salida de la turbina, kJ/kg°C

### **3.3.2. Consumo de Vapor en Difusor de Caña.**

El cálculo de consumo de vapor en el difusor puede ser tanto como para el sistema de inyectores al difusor, así como para calentar agua de imbibición.

#### **A. Salida de Jugo Filtrado del Difusor**

##### **a. Calculo del flujo de caña**

$$TCH = \frac{TCD}{Tm} \quad (3.5)$$

Donde:

TCD: Tonelada caña día

Tm: Tiempo de molienda

**b. Calculo de fibra % bagazo**

$$\text{Fibra \% bagazo} = 100 - (\%H \text{ Bz} + \% \text{sol BZ}) \quad (3.6)$$

Donde:

% H Bz: Humedad del bagazo

% sol Bz: Solidos disueltos en bagazo

**c. Hallando fibra producida**

$$F_{\text{fibra producida}} (Tn) = \left( \frac{TCD}{Tm} \right) * \text{fibra\%caña} \quad (3.7)$$

Donde:

TCD: Tonelada caña día

Tm: Tiempo de molienda

**d. Hallando agua de imbibición**

$$TN = \text{fibra\%caña} * TCH \quad (3.8)$$

$$F_{\text{agua imbibicion}}(Tnhr) = TN * 2.5 \quad (3.9)$$

Donde:

TCH: Tonelada caña hora

**e. Hallando agua de imbibición % caña**

$$\text{imbibicion\%caña} = \frac{F_{\text{agua imbibicion}}}{F_{\text{fibra producida}}} * 100 \quad (3.10)$$

**f. Bagazo a la salida del difusor**

$$B_{SD}(Tnhr) = TCH(\text{fibra\%caña} * 5) \quad (3.11)$$

**g. Bagazo del molino secador**

$$B_{MS}(Tnhr) = \frac{\text{fibra\%caña}}{\text{fibra\%bagazo}} * TCH \quad (3.12)$$

**h. Bagazo Diario**

$$B_{Z_{dia}}(Tnd) = B_{SD} * Tm \quad (3.13)$$

**i. Flujo másico de jugo residual**

$$J_{RS}(Tnhr) = B_{SD} - B_{MS} \quad (3.14)$$

**j. Flujo másico de jugo mixto**

$$J_{Mixto}(Tnhr) = (TCH + F_{\text{agua imbibicion}} - B_{MS}) + (0.5 * J_{RS}) \quad (3.15)$$

**k. Bagazo recuperado**

$$B_{Rec}(Tnhr) = J_{Mixto} * 4\% \quad (3.16)$$

**l. Flujo másico de jugo colado**

$$J_{filtrado}(Tnhr) = J_{Mixto} - B_{Rec} \quad (3.17)$$

**B. Consumo de Vapor en los Inyectores del Difusor**

$$m_{vapor}(Tnhr) = \frac{m_j * 1000(\lambda_{js} - \lambda_{je} * 0.95)}{\lambda_{vapor} * 0.95 - \lambda_{js}} \quad (3.18)$$

**Donde:**

$m_{\text{vapor}}$ : Flujo de vapor, (Tn/hr)

$m_j$ : Flujo de jugo mixto, (tn/hr)

$\lambda_{js}$ : Entalpia jugo de salida, (kj/kg)

$\lambda_{je}$ : Entalpia jugo de salida, (kj/kg)

$\lambda_{\text{vapor}}$ : Entalpia vapor de consumo, (tn/hr)

**a. Entalpia de salida del jugo recirculante**

$$\lambda_{\text{jugosalida}}(\text{kj/kg}) = T_{\text{sal.jugo}} * C_{P\text{jugo}} \quad (3.19)$$

**Donde:**

$T_{\text{saljugo}}$ : Temperatura de salida del jugo, (°C)

$C_{P\text{jugo}}$ : Calor especifico del jugo, (kj/kg°C)

**b. Entalpia de entrada del jugo recirculante**

$$\lambda_{\text{jugoentrada}}(\text{kj/kg}) = T_{ej} * C_{P\text{jugo}} \quad (3.20)$$

**Donde:**

$T_{ej}$ : Temperatura de entrada del jugo, (°C)

$C_{P\text{jugo}}$ : Calor especifico del jugo, (kj/kg°C)

**c. Calor especifico del jugo**

$$C_{P\text{jugo}}(\text{kj/kg } ^\circ\text{C}) = 4.1845 * (1 - 0.006 * Bx_{\text{jugo}}) \quad (3.21)$$

**Donde:**

$Bx_{\text{jugo}}$ : Brix jugo recirculante, (%)

### 3.3.3. Consumo de Vapor en los Calentadores

El cálculo de los calentadores puede resumirse a un simple balance de energía, el calor concebido por el vapor es igual al calor absorbido por el jugo:

$$\dot{m}_j * c_p * (t_{sj} - t_{ej}) * \eta = \dot{m}_v * h_{vap} = Q \quad (3.22)$$

**Donde:**

$\dot{m}_j$ : Flujo másico de jugo, kg/s

$c_p$ : Calor específico del jugo, kJ/kg°C

$t_{ej}$ : Temperatura de entrada de jugo, °C

$t_{sj}$ : Temperatura de salida, °C

$\dot{m}_v$ : Flujo masico de vapor

$h_{vap}$ : Entalpia de vaporización, kJ/kg

$Q$ : Calor transferido

#### a. Formula de Hugot

Hugot plantea en su bibliografía fórmulas para calcular el consumo de vapor sin tener como dato la temperatura de salida del jugo. Se asume que los calentadores tienen las mismas características: número de pasos, tubos por cada paso, longitud y diámetro interno de las tuberías.

$$\dot{m}_v = \frac{Q}{\eta * h_{vap} * 1000} \quad (3.23)$$

**Donde:**

$\dot{m}_v$ : Flujo de Vapor, Tn/h

$\eta$ : Eficiencia, decimales

$h_{vap}$ : Entalpia de evaporación, kcal/kg

$Q$ : Demanda de calor, kcal/h

### b. Demanda de Calor

$$Q = \dot{m}_{ej} \times C_{ej} \times (T_v - T_{ej}) \times \left( 1 - \frac{1}{\exp\left(\frac{k \times s}{\dot{m}_{ej} \times C_{ej} \times 1000}\right)} \right) \times 1000 \quad (3.24)$$

**Donde:**

Q: demanda de calor, kcal/h

$\dot{m}_{ej}$ : Flujo de entrada de vapor, Tn/h

$T_v$ : Temperatura de Vapor, °C

$T_{ej}$ : Temperatura de Entrada jugo, °C

S: Superficie de calentamiento, m<sup>2</sup>

K: Coeficiente de transferencia Térmica, kcal/h x m<sup>2</sup> x °C

$C_{ej}$ : Calor Especifico del jugo, kcal/kg°C

### c. Superficie de Calentamiento

$$S = \pi (\#paso \text{ calent}) \times (\#tubos/paso) \times D_i \times L \quad (3.25)$$

**Donde:**

S: superficie de calentamiento, m<sup>2</sup>

#paso calent: número de pasos por calentamiento

#tubos / paso: número de tubos por paso de calentamiento

$D_i$ : Calentamiento interior de los tubos, m

L: longitud de los tubos, m

#### d. Calor específico del Jugo

$$C_{ej} = \frac{4.1868 - bx \times [0.0297 - (4.6 \times 10^{-5} \times pza)] + 7.5 \times 10^{-5} \times bx \times T_j}{4.1855} \quad (3.26)$$

**Donde:**

$C_{ej}$ : Calor Especifico del jugo, kcal/kg°C

$bx$ : Brix del jugo, porcentaje

$pza$ : pureza del jugo, porcentaje

$T_j$ : Temperatura del jugo, °C

#### e. Coeficiente de Transferencia Térmica

$$k = 7 \times Tv \left( \frac{V_j}{1.8} \right)^{0.8} \quad (3.27)$$

**Donde:**

$Tv$ : Temperatura de Vapor, °C

$V_j$ : Velocidad del jugo en el calentador, m/s

#### f. Velocidad del calentador

$$V_j = \frac{\dot{m}_{ej}}{d_j \times A_p \times 3600} \pi r^2 \quad (3.28)$$

**Donde:**

$\dot{m}_{ej}$ : Flujo de entrada de jugo, Tn/h

$d_j$ : Densidad del jugo, Tn/m<sup>3</sup>

$A_p$ : Área de Pase, m<sup>2</sup>

**g. Área de pase**

$$A_p = (\#tubos / calent) \times \frac{\pi x D_i^2}{4} \quad (3.29)$$

**Donde:**

$A_p$ : Área de Pase, m<sup>2</sup>

# Tubos / calent: números de tubos por paso de calentamiento

$D_i$ : Diámetro interior, m

**h. Densidad del jugo**

$$d_j = \left[ 1 + \frac{bx(bx+200)}{5400} \right] x \left[ 1 - \frac{0.036x(T_j-20)}{160-T_j} \right] \quad (3.30)$$

**Donde:**

$d_j$ : Densidad del jugo, Tn/m<sup>3</sup>

bx: brix del jugo, porcentaje

$T_j$ : Temperatura del Jugo, °C

**i. Temperatura de salida del Jugo**

$$T_{sj} = \left( T_v - \frac{T_v - T_{ej}}{\exp\left(\frac{k x s}{m_{ej} x C_{ej} x 1000}\right)} \right) \quad (3.31)$$

### 3.3.4. Consumo de Vapor en los Calentadores Directos – DCH

El DCH es un intercambiador de calor donde la calefacción y el medio calentado entran en contacto directo en contracorriente. En el caso de contacto directo la diferencia de temperatura del flujo final saliente podría mantenerse tan bajo como 1-3 °C, al del flujo calefactor. Se puede trabajar sin ninguna necesidad de limpieza estos tipos nuevos de sistema incorporados a la industria azucarera.

$$\dot{m}_v = \frac{(T_s - T_e) * C_{ej} * \dot{m}_j}{h_{vap}} \quad (3.32)$$

**Donde:**

$\dot{m}_v$ : Flujo de vapor Tn/h

$h_{vap}$ : Entalpia de evaporación, kcal/kg

$\dot{m}_j$ : Flujo de entrada de jugo, Tn/h

$C_{ej}$ : Calor Especifico del jugo, kcal/kg°C

$T_s$ : Temperatura de salida, °C

$T_e$ : Temperatura de entrada, °C

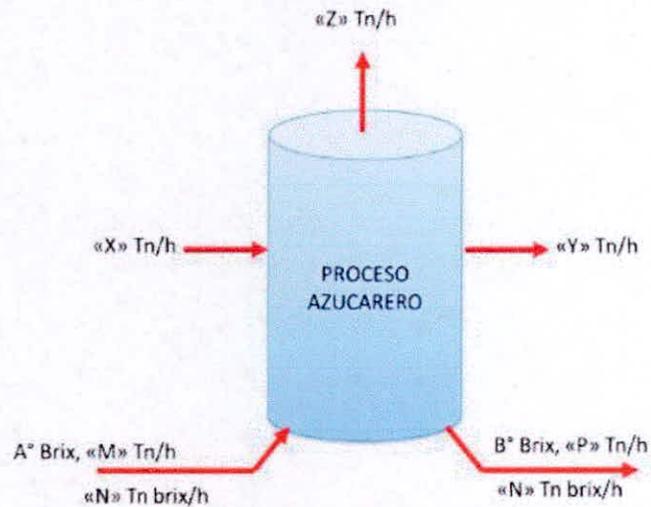
### 3.3.5. Consumo de Vapor en los Evaporadores

El cálculo de los evaporadores resulta ser mucho más práctico utilizando en principio Riilleux.

#### **Balance de Materiales**

Tanto el brix como el pol de una sustancia azucarada están en constante variación, es decir el porcentaje puede aumentar o disminuir de acuerdo al proceso que está siendo sometido. Un diagrama de masas se puede apreciar en la figura N° 27.

Brix indica el porcentaje en masa de los sólidos disueltos, para el azúcar.



**FIGURA N° 27: Balance de masas en el Evaporador**

**Fuente:** Sandoval A. (Tesis)

### **Calculo para múltiples Efectos según del Principio de Riilleux**

Los cálculos para la evaporación de varios efectos en serie se pueden simplificar significativamente mediante el uso de algunas teorías, con lo cual podemos obtener resultados que son sorprendentemente precisas para sistemas de evaporación concurrentes. Las teorías requeridas son:

- El calor específico de evaporación no cambia con la presión.
- Todas las entalpias de los líquidos son constantes, independientemente de la temperatura y la concentración de solidos disueltos.
- No existen perdidas de calor.
- 1 kg de vapor saturado en un evaporador, evapora 1 kg de agua.

Estas suposiciones conducen a errores que tienen efecto opuesto, cancelándose parcialmente entre ellos.

La desventaja del principio de Riilleux radica en que no considera las tasas de transferencia de calor y las áreas, para lo cual se hace necesario utilizar un procedimiento de cálculo más riguroso.

Por lo cual, el punto de partida es el cálculo de la evaporación total en el sistema, iniciando en un balance global de sólidos sobre un tren evaporadores de “n” efectos.

**a. Balance de masas en el evaporador**

$$Bx_j \times \dot{m}_j = Bx_m \times \dot{m}_m \quad (3.33)$$

**Donde:**

$Bx_j$ : Brix de jugo, porcentaje

$Bx_m$ : Brix de jarabe, porcentaje

$\dot{m}_j$ : Flujo de jugo (entrada a los evaporadores), Tn/h

$\dot{m}_m$ : Flujo de jarabe o miel (salida de los evaporadores), Tn/h

**b. Agua evaporada en el sistema evaporador**

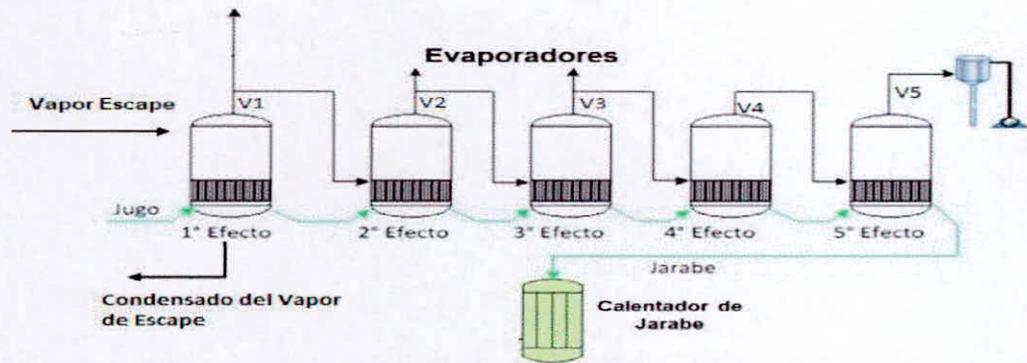
$$\dot{m}_{ae} = \dot{m}_j - \dot{m}_m = \dot{m}_j \left( 1 - \frac{bx_j}{bx_m} \right) \quad (3.34)$$

Donde:

$\dot{m}_{ae}$ : Cantidad de agua evaporada, Tn/h

**c. Evaporadores.**

El vapor de escape VE alimenta al primer evaporador donde se produce el efecto 1 y se produce el primer sangrado V1 (o mejor dicho evaporación de agua), el cual sale del ingreso de jugo clarificado en el primer evaporador. A la vez ese Sangrado V1, será el cual planta consumirá para sus procesos, y el resto del sangrado V1 será el que ingrese al segundo evaporador y se produzca el segundo sangrado V2, así secuencialmente hasta llegar al quinto evaporador, donde se produzca el sangrado V5, y al final el jugo clarificado se convierta en jarabe.



**FIGURA N° 28: Diagrama de Evaporadores**

**Fuente:** Sandoval (Tesis)

#### d. Incremento del punto de ebullición

Los evaporadores trabajan a distintas presiones en cada efecto, y por lo tanto a distintas temperaturas en el cuerpo. A medida que la concentración del brix del jugo incrementa, la temperatura de ebullición del líquido aumenta por encima de la correspondiente temperatura de vapor saturado a igual presión. La elevación del punto de ebullición es una consecuencia de los cambios de las propiedades del líquido. El grado de elevación del punto de ebullición está determinado por la concentración. La elevación del punto de ebullición  $\Delta_{tb}$  está dada por la siguiente aproximación:

$$\Delta_{tb} = \frac{2 \times bx_m}{100 - bx_m} \quad (3.35)$$

**Donde:**

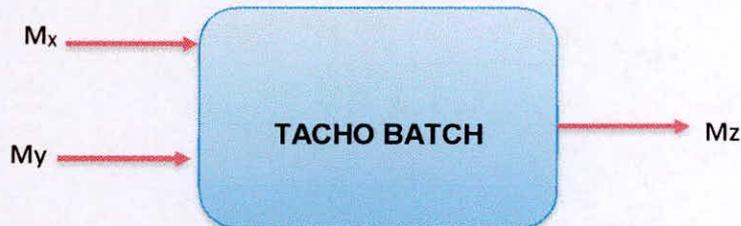
$\Delta_{tb}$ : incremento del punto de ebullición, °C.

$bx_m$ : brix medio, (brix entrada + brix salida) / 2, porcentaje

Este dato es importante para el balance porque nos dará la temperatura del jarabe a la salida del último efecto.

### 3.3.6. Consumo de Vapor en el Tacho Batch.

#### A. Balances de Masas.



**FIGURA N° 29: Balance de masas en un Tacho Batch**

#### a. Calculo de sólidos en $M_x$ y $M_z$ .

$$\text{sol}_{MX}(\text{Tn}) = M_x * BxM_x \quad (3.36)$$

$$\text{sol}_{MZ}(\text{Tn}) = M_z * BxM_z \quad (3.37)$$

#### b. Calculo de Pureza de $M_z$ .

$$PZ_{MZ}(\%) = \left( \frac{\text{sol}_{MX} * (PZ_{MX} - PZ_{MY})}{\text{sol}_{MZ}} \right) + PZ_{MY} \quad (3.38)$$

#### c. Calculando % solidos de $\text{sol}_{MX}$ y $\text{sol}_{MY}$ en $M_z$ .

$$\% \text{sol}_{MX}(\%) = \left( \frac{PZ_{MZ} - PZ_{MY}}{PZ_{MX} - PZ_{MY}} \right) * 100 \quad (3.39)$$

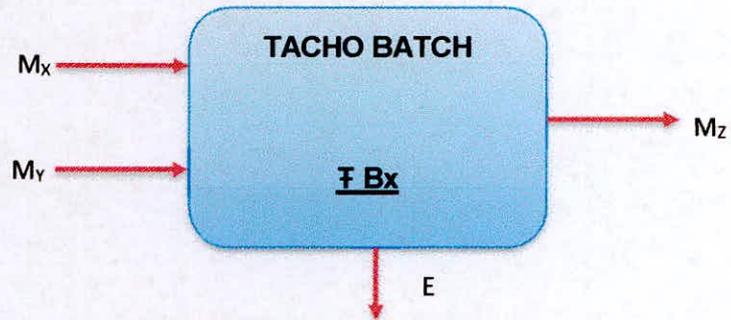
$$\% \text{sol}_{MY}(\%) = 100 - \% \text{sol}_{MX} \quad (3.40)$$

#### d. Calculo de sólidos de $M_y$ .

$$\text{sol}_{MY}(\text{Tn}) = \left( \frac{\% \text{sol}_{MY}}{100} \right) * \text{sol}_{MZ} \quad (3.41)$$

#### e. Calculo de $M_y$ .

$$M_y(\text{Tn}) = \text{sol}_{MY} * \left( \frac{100 M_y}{BxM_y} \right) \quad (3.42)$$

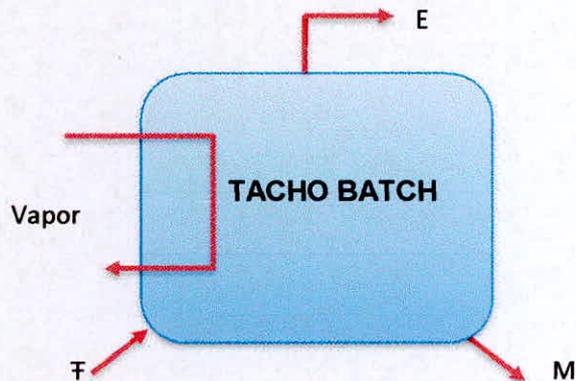


**FIGURA N° 30: Total de masas en un Tacho Batch**

**f. Calculo de Brix F Bx.**

$$F Bx (\%) = \left( \frac{M_x \cdot Bx_{Mx} + M_y \cdot Bx_{My}}{E + M_z} \right) \quad (3.43)$$

**B. Balance de Vapor**



**FIGURA N° 31: Balance de vapor en un Tacho Batch**

**a. Calculamos Brix dentro del tacho batch.**

$$B_{xi} (\%) = \left( \frac{F B_x + M B_x}{2} \right) \quad (3.44)$$

**b. Calculamos la elevación de ebullición.**

$$e(^{\circ}C) = \left( \frac{2 \cdot B_{xi}}{100 - B_{xi}} \right) \quad (3.45)$$

**c. Calculamos la temperatura de ebullición.**

$$TM (^{\circ}C) = e + Temp_{cuerpo} \quad (3.46)$$

**d. Calor específico  $c_p Mi$ .**

$$c_p Mi (Kcal/Kg^{\circ}C) = 1 - 0.006(Bxi) \quad (3.47)$$

**e. Diferencia de temperatura  $\Delta T$ .**

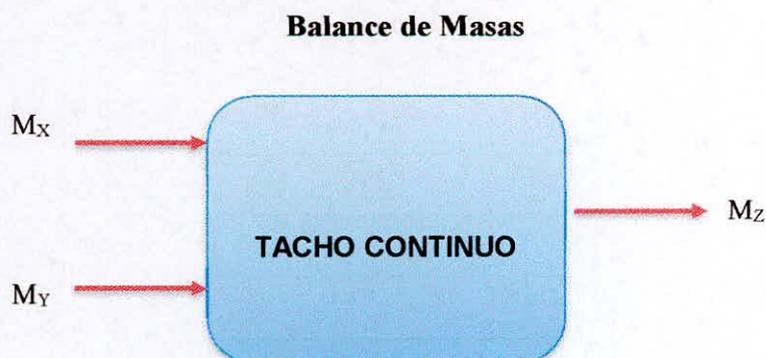
$$\Delta T (^{\circ}C) = TM_i - TT_e \quad (3.48)$$

**f. Calculo consumo de vapor en Tacho Batch.**

$$V(Tn) = \left( \frac{\left( \frac{T * c_p Mi * \Delta T + E * \lambda_E}{\lambda_{vapor}} \right)}{Tiempo_{cocimiento}} \right) \quad (3.49)$$

### 3.3.7. Consumo de Vapor en Tacho Continuo.

**A. Balances de Masas.**



**FIGURA N° 32: Balance de masas en un Tacho Continuo**

**a. Calculo solidos % sol<sub>MX</sub> en M<sub>Z</sub>.**

$$\%sol_{MX} (\%) = \left( \frac{Pz_{MZ} - Pz_{MY}}{Pz_{MX} - Pz_{MY}} \right) * 100 \quad (3.50)$$

**b. Calculo solidos % sol<sub>MY</sub> en M<sub>Z</sub>.**

$$\%sol_{MY} (\%) = 100 - sol_{MX} \quad (3.51)$$

**c. Calculo de sólidos en M<sub>Z</sub>.**

$$sol_{MZ}(Tn) = M_Z * BxM_Z \quad (3.52)$$

**d. Calculo de sólidos en M<sub>X</sub>.**

$$sol_{MX}(Tn) = sol_{MZ} * \left( \frac{\%sol_{MX}}{100} \right) \quad (3.53)$$

**e. Calculando M<sub>X</sub>.**

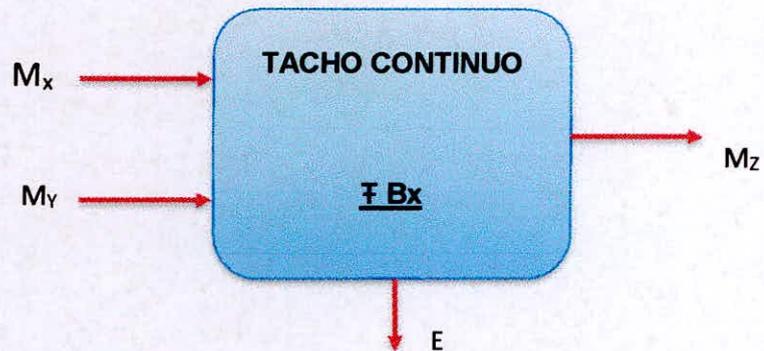
$$M_X(Tn) = sol_{MX} * \left( \frac{100}{BxM_X} \right) \quad (3.54)$$

**f. Calculo de sólidos en M<sub>Y</sub>.**

$$sol_{MY}(Tn) = sol_{MZ} * \left( \frac{\%sol_{MY}}{100} \right) \quad (3.55)$$

**g. Calculando M<sub>Y</sub>.**

$$M_Y(Tn) = sol_{MY} * \left( \frac{100}{BxM_Y} \right) \quad (3.56)$$

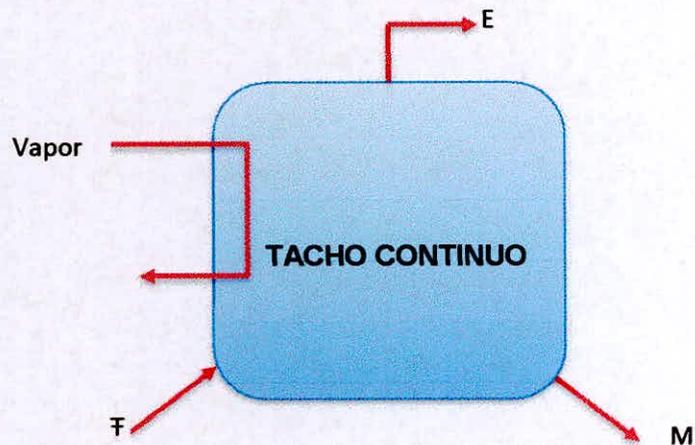


**FIGURA N° 33: Total de masas en un tacho continuo**

**h. Calculo de Brix F Bx.**

$$F Bx (\%) = \left( \frac{M_x * BxM_x + M_y * BxM_y}{M_z + E} \right) \quad (3.57)$$

**B. Balance de Vapor.**



**FIGURA N° 34: Balance de vapor en un tacho continuo**

**a. Calculando Brix dentro del tacho continuo.**

$$Bxi (\%) = \left( \frac{FBx + MBx}{2} \right) \quad (3.58)$$

**b. Calculando la elevación de ebullición.**

$$e(^{\circ}\text{C}) = \left( \frac{2 * Bxi}{100 - Bxi} \right) \quad (3.59)$$

**c. Calculamos la temperatura de ebullición.**

$$TM (^{\circ}\text{C}) = e + Temp_{cuerpo} \quad (3.60)$$

**d. Calor específico  $c_p Mi$ .**

$$c_p Mi (\text{Kcal/Kg}^{\circ}\text{C}) = 1 - 0.006(Bxi) \quad (3.61)$$

**e. Diferencia de temperatura  $\Delta T$ .**

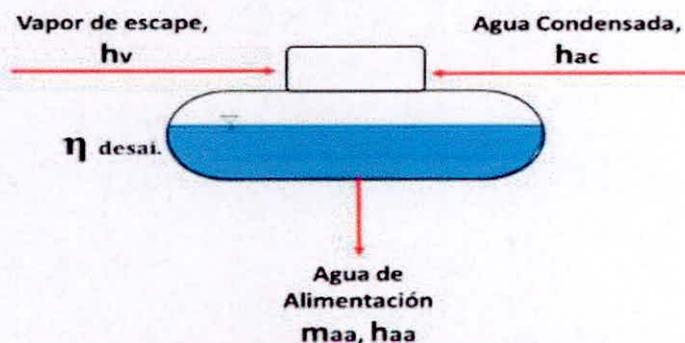
$$\Delta T(^{\circ}\text{C}) = TM_i - TT_e \quad (3.62)$$

**f. Calculo de consumo de vapor.**

$$V(Tn) = \left( \frac{T * c_p Mi * \Delta T + E * \lambda_E}{\lambda_{vapor}} \right) \quad (3.63)$$

### 3.3.8. Consumo de Vapor en el Desaireador.

El Desaireador se comporta como un equipo de transferencia de calor de contacto directo. A través de un balance de energía y balance de masas se puede calcular el consumo de vapor en el Desaireador y el consumo de agua condensada.



**FIGURA N° 35: Esquema en el Desaireador**

$$\eta [ \dot{m}_{ve} * h_{ve} + \dot{m}_{ac} * h_{ac} ] = \dot{m}_{aa} * h_{aa} \quad (3.64)$$

$$\dot{m}_{ve} + \dot{m}_{ac} = \dot{m}_{aa} \quad (3.65)$$

Donde:

$\dot{m}_{ve}$ : Flujo de vapor de escape, Tn/h.

$h_{ve}$ : Entalpia de vapor de escape, kJ/kg.

$\dot{m}_{ac}$ : Flujo de agua condensada, Tn/h.

$h_{ac}$ : Entalpia de agua de condensada, kJ/kg.

$\dot{m}_{aa}$ : Flujo de agua de alimentación, Tn/h.

$h_{aa}$ : Entalpia de agua de alimentación, kJ/kg.

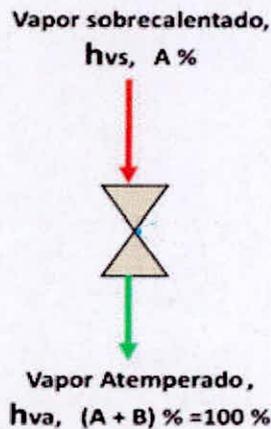
$\eta$ : eficiencia del Desaireador, %.

### 3.3.9. Sistema de estaciones Reductoras de Presión.

Cuando el vapor de alta presión se reduce, hasta la presión de escape, la entalpia se mantiene prácticamente constante, es decir, el proceso es adiabático. Dependiendo de las condiciones de entrada y salida la temperatura del vapor reducido estará entre 40 y 70 °C por debajo de la temperatura del vapor vivo.

Para efectos de control de temperatura el vapor reducido se debe atemperar hasta cerca de 10 °C por encima de la temperatura de saturación. El vapor atemperado cambia de entalpia igual a la del vapor de escape.

Como datos iniciales se requiere las entalpias del vapor sobrecalentado del agua para atemperar y del vapor de escape. Los porcentajes de agua y vapor sobrecalentado para determinadas los consumos.



**FIGURA N° 36: Sistema Reductor de Presión**

**a. Porcentaje de vapor que ingresa a la estación reductora.**

$$\%V_s = \left( \frac{h_{va} - h_a}{h_{vs} - h_a} \right) \quad (3.66)$$

**Donde:**

$\%V_s$ : Porcentaje de vapor sobrecalentado que ingresa a la estación reductora.

$h_{va}$  : Entalpia de vapor atemperado, kJ/kg

$h_a$  : Entalpia de agua, kJ/kg

$h_{vs}$ : Entalpia de vapor sobrecalentado, kJ/kg

El flujo de vapor que ha de salir de la estación reductora se determina de acuerdo a la demanda de que requiera el proceso.

**b. Consumo de agua en el Atemperador o Saturador de Temperatura**

En el saturador de temperatura inyecta agua para disminuir la temperatura del vapor que pasa por el sistema de reductoras de presión. Para realizar el balance de consumo de agua se debe utilizar la fórmula (3.65) del presente capitulo.

### 3.3.10. Calculo de la Eficiencia del Generador de Vapor.

#### A. Método directo.

La eficiencia de un generador de vapor, se tiene como la relación entre la salida de energía y el suministro de energía por unidad de tiempo.

$$\eta = \frac{m_{vs} (h_{vs} - h_{aa})}{\dot{m}_b * h_u} \quad (3.67)$$

**Donde:**

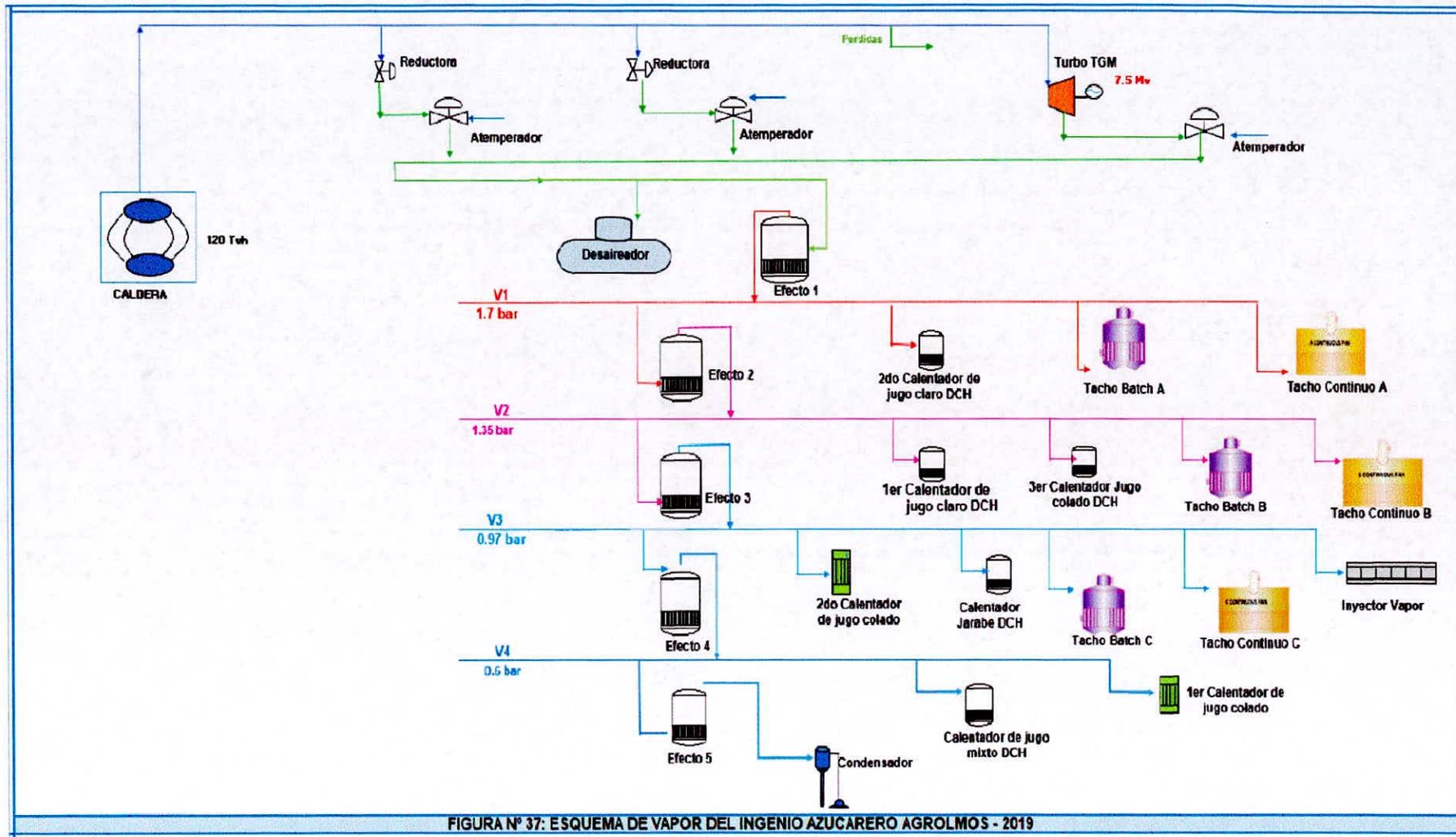
$m_{vs}$ : Flujo de Vapor sobrecalentado, Tn/h.

$h_{vs}$ : Entalpia de Vapor sobrecalentado, kJ/kg

$h_{aa}$ : Entalpia de agua de alimentación, kJ/kg.

$\dot{m}_b$ : Flujo de bagazo, Tn/h.

$h_u$ : Poder calorífico, kJ/kg.



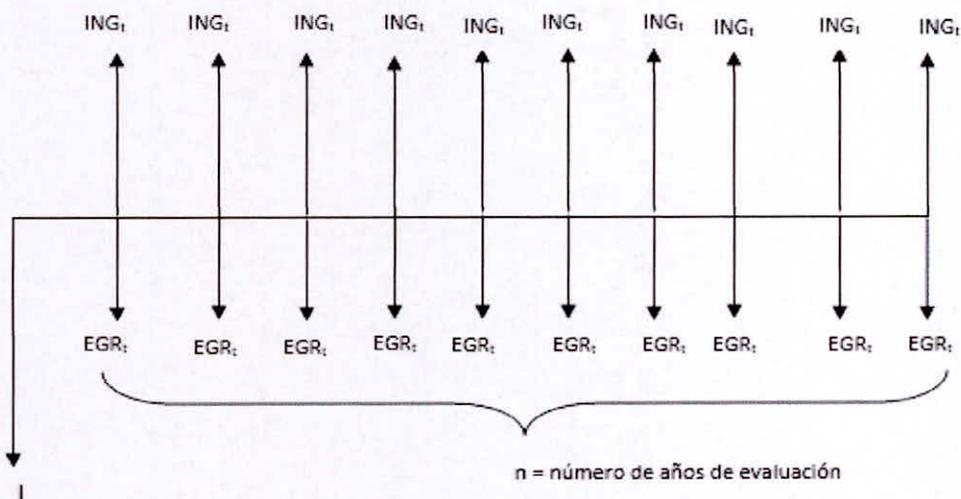
### 3.3.11. Generalidades de la Evaluación Económica

Su finalidad es examinar el entorno financiero y cumple básicamente tres funciones:

- Determinar la factibilidad en que todos los costos pueden ser cubiertos oportunamente.
- Mide la rentabilidad de la inversión.
- Genera la información necesaria para realizar una comparación del proyecto con otras oportunidades de inversión.

Los métodos para la evaluación de un proyecto, consideran el valor del dinero a través del tiempo como la Tasa Interna de Rendimiento (TIR), el Valor presente Neto (VAN) y el Pay Back.

Los flujos de ingresos y egresos se representan de la siguiente forma:



**FIGURA N° 38: Flujo de Caja en un periodo de tiempo “n” de análisis**

**Fuente:** Haro y Crispin (Tesis)

Donde:

- La Inversión Inicial (I): Es el valor inicial o inversión que realizara una empresa. Esta cantidad pertenece al valor de los activos fijos, la inversión y el capital de trabajo.
- Flujos de Caja (FC): Pertenece a los flujos de caja futuro en los que la empresa obtendrá anualmente o en otro periodo de tiempo, y se estimas a través de un flujo de caja anual entre los ingresos y egresos.

Para determinar los flujos de caja se tiene la ecuación:

$$FC = ING_t - EGR_t \quad (3.68)$$

Donde:

ING<sub>t</sub>: ingresos por venta de energía y potencia, ahorros de combustible y consumos de energía externa.

EGR<sub>t</sub>: Egresos por costos de operación Mantenimientos y Mantenimientos anuales.

## **A. Indicadores de Rentabilidad.**

### **a. Valor Actual Neto.**

El VAN normalmente es un indicador de rentabilidad. Representa la diferencia que hay entre el valor actual de los flujos de fondos de la inversión y la capital inicial. El VAN permite traer los flujos de caja futuros al valor presente, descontados a una tasa de descuento específica, para así poder compararlos con la inversión. (Jimenez, 2007, p.80)

Al evaluar el valor del VAN se debe tener en cuenta las siguientes condiciones:

Si VAN > 0: El proyecto es rentable.

Si VAN = 0: El proyecto es postergado.

Si VAN < 0: El proyecto no es rentable.

A la hora de elegir entre dos proyectos, se elige aquel que tenga el mayor VAN.

La fórmula para calcular el Valor Actual Neto (VAN):

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{FC}{(1+i)^t} - I \quad (3.69)$$

La tasa de descuento: Es la tasa de inversión del mercado igual a 12 %.

#### **b. Tasa interna de retorno.**

La tasa interna de retorno (TIR), representa la tasa que iguala el valor presente neto a cero. Es la tasa que iguala la suma de los flujos descontados a la inversión inicial. La TIR es la tasa de interés real que genera el proyecto en “n” periodos.

La evaluación de los proyectos de inversión cuando se hace con base en la Tasa Interna de Retorno, toman como referencia la tasa de descuento. (Jimenez, 2007, p.116)

Se tiene los siguientes criterios de decisión:

Si  $TIR > i$ : El proyecto es rentable.

Si  $VAN \leq 0$ : El proyecto se debe rechazar.

La fórmula para calcular el valor de la tasa interna de retorno (TIR):

$$0 = -I + \sum_{t=1}^n \frac{FC}{(1+i)^t} \quad (3.70)$$

#### **c. Pay Back**

Es valor económico por el cual determinamos el periodo de retorno de la inversión. Teniendo como finalidad solo la recuperar la inversión; con los ingresos generados del proyecto. Relacionando el flujo de caja entre la inversión realizada. (Jimenez, 2007, p.178)

$$\text{Pay Back} = \frac{FC}{I} \quad (3.71)$$

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Cálculos de Vapor en el Sistema de Difusor.

El ingenio azucarero no cuenta con turbinas de accionamiento mecánico en el área de extracción y molienda, por lo cual nuestro balance de vapor llegara a realizarse desde el área de difusor hasta el proceso final de azúcar.

Para el balance de jugo, agua imbibición y bagazo en difusores usaremos las fórmulas de 3.5 hasta 3.17.

**TABLA N° 2: Balance de flujos en el difusor**

| <b>Balance en Difusor</b>                         |                |             |
|---|----------------|-------------|
| <b>Datos Generales</b>                            | <b>Valores</b> | <b>U.M.</b> |
| Molienda diaria                                   | 5600           | TCD         |
| Horas efectivas de molienda                       | 23             | h           |
| Flujo de caña                                     | 243.48         | Tn/h        |
| Fibra % caña                                      | 14             | %           |
| Horas efectivas de procesos                       | 24             | h           |
| <b>Datos Obtenidos<br/>Propiedades del bagazo</b> |                |             |
| Fibra % bagazo                                    | 51.39          | %           |
| Fibra producida                                   | 34.09          | Tn/h        |
| Agua de imbibición                                | 85.2           | Tn/h        |
| Imbibición % fibra                                | 250            | %           |
| <b>Flujo de bagazo</b>                            |                |             |
| Bagazo salida difusor                             | 170.43         | Tn/h        |
| Bagazo salida molino secador                      | 66.33          | Tn/h        |
| Bagazo diario                                     | 1525.59        | Tnd         |
| <b>Flujo de jugo de Difusor</b>                   |                |             |
| Flujo másico de jugo residual                     | 104.1          | Tn/h        |
| Flujo másico de jugo mixto                        | 312.34         | Tn/h        |
| Bagazo recuperado                                 | 12.5           | Tn/h        |
| Brix del jugo mixto                               | 13.2           | Tn/h        |
| <b>Flujo másico de jugo mixto</b>                 | <b>299.84</b>  | <b>Tn/h</b> |

### A. Inyectores de vapor a difusor

Para el balance de consumo de vapor de difusor por medio de los inyectores, utilizaremos las formulas del 3.18 hasta el 3.21

**TABLA N° 3: Consumo total de vapor en los inyectores a difusor**

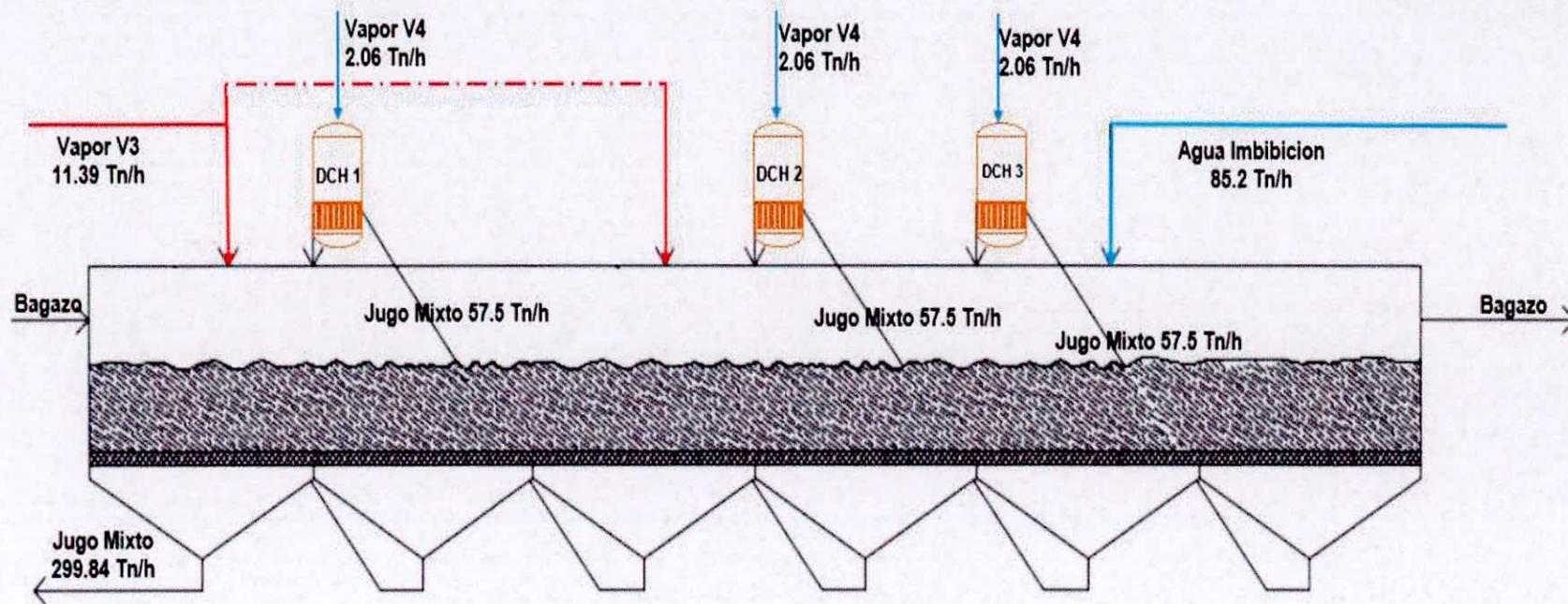
| <b>Balance en Difusor</b>                    |                |             |
|--|----------------|-------------|
| <b>Datos Generales</b>                       | <b>Valores</b> | <b>U.M.</b> |
| Molienda diaria                              | 5600           | TCD         |
| Horas efectivas de molienda                  | 23             | h           |
| Flujo de caña                                | 243.48         | Tn/h        |
| Fibra % caña                                 | 14             | %           |
| Flujo másico de jugo colado                  | 299.84         | Tn/h        |
| <b>Inyectores de vapor a difusor</b>         |                |             |
| <b>Propiedades del jugo</b>                  | <b>Valores</b> | <b>U.M.</b> |
| Flujo másico de jugo colado                  | 299.84         | Tn/h        |
| Brix del jugo                                | 13.2           | %           |
| Temperatura de ingreso de jugo recirculante  | 52             | °C          |
| Temperatura de salida de jugo recirculante   | 68             | °C          |
| <b>Propiedades del Vapor</b>                 |                |             |
| Presión de vapor                             | 0.97           | Bar@        |
| Temperatura de vapor                         | 98.77          | °C          |
| Calor latente de evaporización               | 2260.19        | kJ/kg       |
| <b>Datos obtenidos del jugo</b>              |                |             |
| Calor especifico del jugo                    | 3.85           | kJ/kg°C     |
| Entalpia de jugo recirculante ingreso        | 200.36         | kJ/kg       |
| Entalpia de jugo recirculante salida         | 262.01         | kJ/kg       |
| <b>Consumo de vapor en los inyectores V3</b> | <b>11.39</b>   | <b>Tn/h</b> |

## B. Calentadores DCH jugo mixto

Para el cálculo de consumo de vapor en los DCH utilizaremos la fórmula 3.22, la cual es para calentadores de contacto directo

**TABLA N° 4: Consumo de vapor en los calentadores de jugo mixto**

| <b>Balance en Difusor</b>             |                |             |
|---------------------------------------|----------------|-------------|
| <b>Datos Generales</b>                | <b>Valores</b> | <b>U.M.</b> |
| Molienda diaria                       | 5600           | TCD         |
| Horas efectivas de molienda           | 23             | h           |
| Flujo de caña                         | 243.48         | Tn/h        |
| Fibra % caña                          | 14             | %           |
| Flujo másico de jugo colado           | 299.84         | Tn/h        |
| <b>Calentador DCH – Jugo Mixto</b>    |                |             |
| <b>Propiedades del jugo</b>           |                |             |
| Jugo mixto total                      | 172.5          | Tn/h        |
| Jugo mixto en calentador N°1          | 57.5           | Tn/h        |
| Jugo mixto en calentador N°2          | 57.5           | Tn/h        |
| Jugo mixto en calentador N°3          | 57.5           | Tn/h        |
| Temperatura de entrada de jugo mixto  | 62             | °C          |
| Brix jugo mixto                       | 13.2           | °%          |
| Pureza jugo mixto                     | 83.5           | %           |
| Temperatura de salida del jugo mixto  | 83             | °C          |
| <b>Propiedades del vapor</b>          |                |             |
| Presión de vapor utilizado            | 0.6            | Bar@        |
| Temperatura de vapor utilizado        | 85.94          | °C          |
| Calor latente de evaporización        | 547.87         | Kcal/kg     |
| Eficiencia del calentador             | 92             | %           |
| <b>Datos obtenidos del jugo</b>       |                |             |
| Calor específico del jugo mixto       | 0.933          | Kcal/kg°C   |
| Consumo de vapor en el Calentador N°1 | 2.06           | Tn/h        |
| Consumo de vapor en el Calentador N°2 | 2.06           | Tn/h        |
| Consumo de vapor en el Calentador N°3 | 2.06           | Tn/h        |
| <b>Consumo de Vapor Total V4</b>      | <b>6.18</b>    | <b>Tn/h</b> |



**FIGURA N° 39: Flujos en el Sistema difusor**

#### 4.2. Consumo en los Calentadores de Jugo Colado.

El calentamiento de jugo colado tiene 3 etapas en serie, dos calentamientos en sistemas carcaza y tubo y el ultimo en un sistema DCH (calentador de contacto directo).

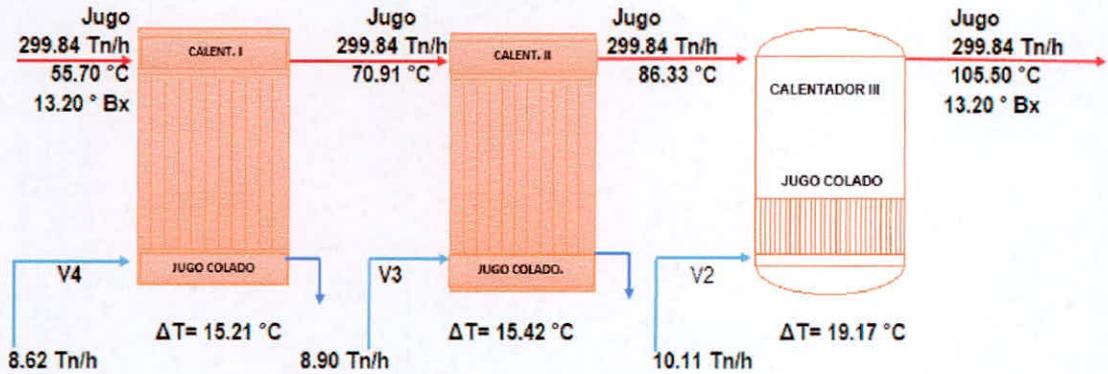
Para el cálculo de consumo de vapor en el sistema de calentamiento de jugo colado, utilizaremos la fórmula de 3.23 hasta 3.32.

**TABLA N° 5: Datos para el balance de vapor en los calentadores de jugo colado**

| <b>Datos Preliminares Para el Consumo de vapor en los Calentadores</b> |                |             |
|--|----------------|-------------|
| <b>Datos de Molienda</b>   |                |             |
|  | <b>Valores</b> | <b>U.M.</b> |
| Molienda diaria  | 5600           | Tn/h        |
| Horas efectivas de molienda  | 23             | h           |
| Flujo de caña  | 243.48         | Tn/h        |
| <b>Jugo mixto en Difusor</b>   |                |             |
| Flujo de jugo mixto del difusor  | 312.34         | Tn/h        |
| Temperatura de salida del jugo   | 68             | °C          |
| Brix de jugo mixto   | 13.2           | %           |
| Pureza   | 83.5           | %           |
| Bagazo recuperado  | 12.49          | Tn/h        |
| <b>Tanque Jugo Colado</b>  |                |             |
| Flujo de jugo colado   | 299.84         | Tn/h        |
| Temperatura de jugo colado   | 55.7           | °C          |
| Brix de jugo colado  | 13.2           | %           |
| Pureza   | 83.7           | %           |

**TABLA N° 6: Consumo de vapor en los calentadores de jugo colado**

| <b>Flujo de Vapor en los Calentadores</b>     |                          |                     |                     |                     |
|---|--------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| <b>Propiedades del jugo colado</b>            |                          |                     |                     |                     |
|   | <b>U.M.</b>              | <b>1°calentador</b> | <b>2°calentador</b> | <b>3°Calentador</b> |
| Flujo de jugo                                 | Tn/h                     | 299.84              | 299.84              | 299.84              |
| Brix  | %                        | 13.2                | 13.2                | 13.2                |
| Temperatura                                   | °C                       | 55.7                | 70.91               | 86.33               |
| Densidad                                      | Tn/m <sup>3</sup>        | 1.04                | 1.03                | 1.02                |
| Calor Especifico                              | kJ/kg°K                  | 3.901               | 3.916               | 3.931               |
|   | Kcal/kg°C                | 0.932               | 0.936               | 0.939               |
| <b>Propiedades del calentador</b>             |                          |                     |                     |                     |
| Tipo de calentador                            |                          | Tubo/Coraza         | Tubo/Coraza         | DCH                 |
| N° pasos                                      | Und.                     | 16                  | 16                  | -                   |
| N° tubos                                      | Und.                     | 33                  | 33                  | -                   |
| Diámetro int. Del tubo                        | m                        | 0.04555             | 0.04555             | -                   |
| Longitud del tubo                             | m                        | 5                   | 5                   | -                   |
| Superficie de calentamiento                   | m <sup>2</sup>           | 377.78              | 377.78              | -                   |
| Eficiencia del calentador                     | %                        | 90                  | 90                  | 95                  |
| <b>Propiedades del vapor de Calentamiento</b> |                          |                     |                     |                     |
| Tipo de vapor                                 |                          | V4                  | V3                  | V2                  |
| Presión de vapor                              | Bar@                     | 0.6                 | 0.97                | 1.35                |
| Temperatura de vapor                          | °C                       | 85.94               | 98.77               | 108.23              |
| Entalpia de evaporización                     | kJ/kg                    | 2293.82             | 2260.19             | 2234.75             |
|   | Kcal/kg                  | 547.87              | 539.84              | 533.76              |
| <b>Parámetros obtenidos</b>                   |                          |                     |                     |                     |
| Área calentamiento                            | m <sup>2</sup>           | 0.054               | 0.054               | -                   |
| Flujo Ent. Jugo                               | Tn/h                     | 299.84              | 299.84              | 299.84              |
| Velocidad del jugo en el calentador           | m/sg                     | 1.49                | 1.503               | -                   |
| Coefficiente de Transf. Térmica               | Kcal/h*m <sup>2</sup> °C | 517.28              | 598.54              | -                   |
| Demanda de calor                              | Kcal/h                   | 4250887.2           | 4324893.1           | -                   |
| Temperatura salida del jugo                   | °C                       | 70.91               | 86.33               | 105.5               |
| <b>Consumo de vapor</b>                       | <b>Tn/h</b>              | <b>8.62</b>         | <b>8.90</b>         | <b>10.11</b>        |



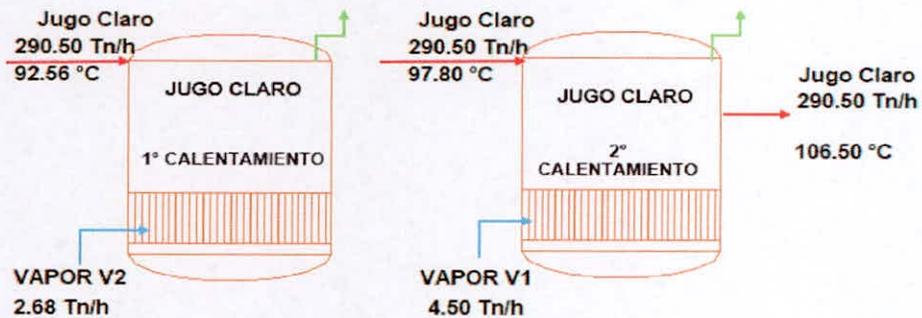
**FIGURA N° 40: Flujos de vapor en los calentadores de jugo colado**

#### 4.3. Consumo de Vapor en el Calentador DCH de Jugo Claro

El calentamiento de jugo claro cuenta con dos etapas en serie con sistema DCH, entonces utilizaremos la fórmula de 3.32 que es para este tipo de sistema.

**TABLA N° 7: Consumos de vapor en los calentadores de jugo claro**

| <b>Flujo de Vapor en los Calentadores DCH</b> |             |                     |                     |
|---|-------------|---------------------|---------------------|
| <b>Propiedades del jugo claro</b>             |             |                     |                     |
|   | <b>U.M.</b> | <b>1°calentador</b> | <b>2°calentador</b> |
| Flujo de jugo                                 | Tn/h        | 290.5               | 290.5               |
| Brix  | %           | 13.2                | 13.2                |
| Temperatura                                   | °C          | 92.56               | 97.8                |
| Pureza  | %           | 83.7                | 83.7                |
| Calor Especifico                              | kJ/kg°K     | 3.94                | 3.94                |
|   | Kcal/kg°C   | 0.941               | 0.942               |
| <b>Propiedades del calentador</b>             |             |                     |                     |
| Eficiencia del calentador                     | %           | 90                  | 90                  |
| Temperatura salida del jugo                   | °C          | 97.8                | 108.65              |
| <b>Propiedades del vapor de Calentamiento</b> |             |                     |                     |
| Tipo de vapor                                 |             | V2                  | V1                  |
| Presión de vapor                              | Bar@        | 1.35                | 1.7                 |
| Temperatura de vapor                          | °C          | 108.23              | 115.16              |
| Entalpia de evaporización                     | kJ/kg       | 2234.75             | 2215.77             |
|   | Kcal/kg     | 533.76              | 529.23              |
| <b>Parámetros obtenidos</b>                   |             |                     |                     |
| <b>Consumo de vapor</b>                       | <b>Tn/h</b> | <b>2.68</b>         | <b>4.50</b>         |



**FIGURA N° 41: Flujos de vapor en los DCH de jugo claro**

**4.4. Consumo de Vapor en el Calentador DCH de Jarabe Crudo.**

De igual manera, para el cálculo de consumo de vapor en el sistema de calentamiento de jarabe, utilizaremos la fórmula de 3.32, sistema DCH.

**TABLA N° 8: Consumo de vapor en los calentadores de jarabe crudo**

| <b>Flujo de Vapor en los Calentadores DCH</b> |             |                     |
|---|-------------|---------------------|
| <b>Propiedades del Jarabe crudo</b>           |             |                     |
|   | <b>U.M.</b> | <b>1°calentador</b> |
| Flujo de jarabe                               | Tn/h        | 69.67               |
| Brix  | %           | 68.4                |
| Temperatura jarabe                            | °C          | 57.8                |
| Pureza  | %           | 84.12               |
| Calor Especifico                              | kJ/kg°K     | 2.72                |
|   | Kcal/kg°C   | 0.649               |
| <b>Propiedades del calentador</b>             |             |                     |
| Eficiencia del calentador                     | %           | 90                  |
| Temperatura salida del jarabe                 | °C          | 88.7                |
| <b>Propiedades del vapor de Calentamiento</b> |             |                     |
| Tipo de vapor                                 |             | V3                  |
| Presión de vapor                              | Bar@        | 0.97                |
| Temperatura de vapor                          | °C          | 98.77               |
| Entalpia de evaporización                     | kJ/kg       | 2260.19             |
|   | Kcal/kg     | 539.84              |
| <b>Parámetros obtenidos</b>                   |             |                     |
| <b>Consumo de vapor</b>                       | <b>Tn/h</b> | <b>2.59</b>         |

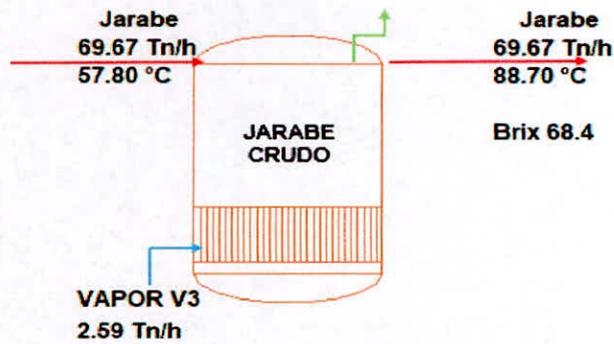


FIGURA N° 42: Flujo de vapor en el DCH de jarabe crudo

#### 4.5. Cálculo de Consumo de Vapor en los Sistemas de Tachos Batch

Para el cálculo de consumo de vapor en los tachos Batch, utilizar formulas desde 3.36 hasta 3.49.

##### A. Consumo de Vapor en Tacho Batch B/C. Grafico del Anexo N° 2.

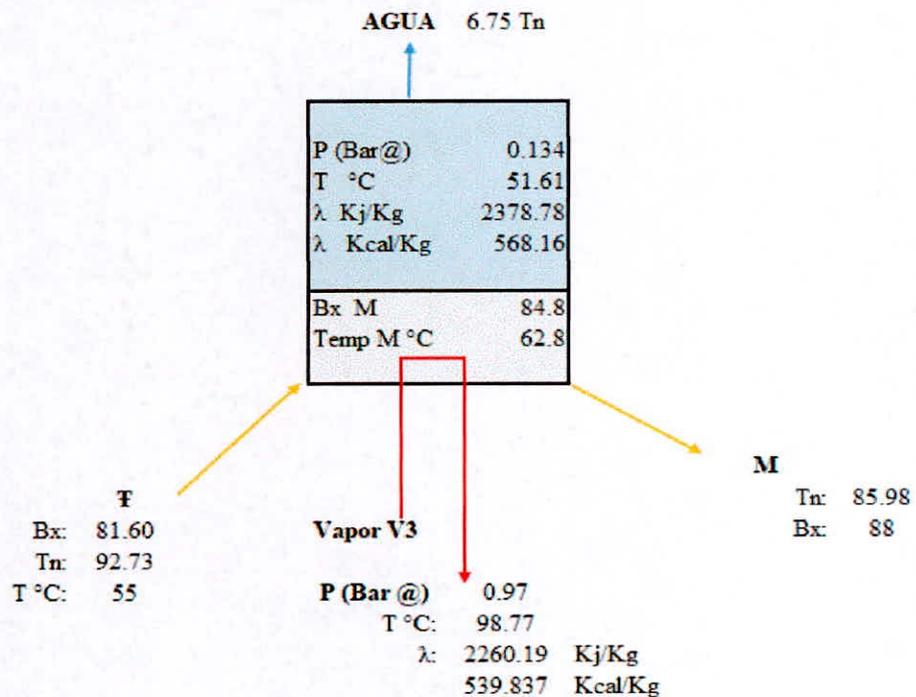
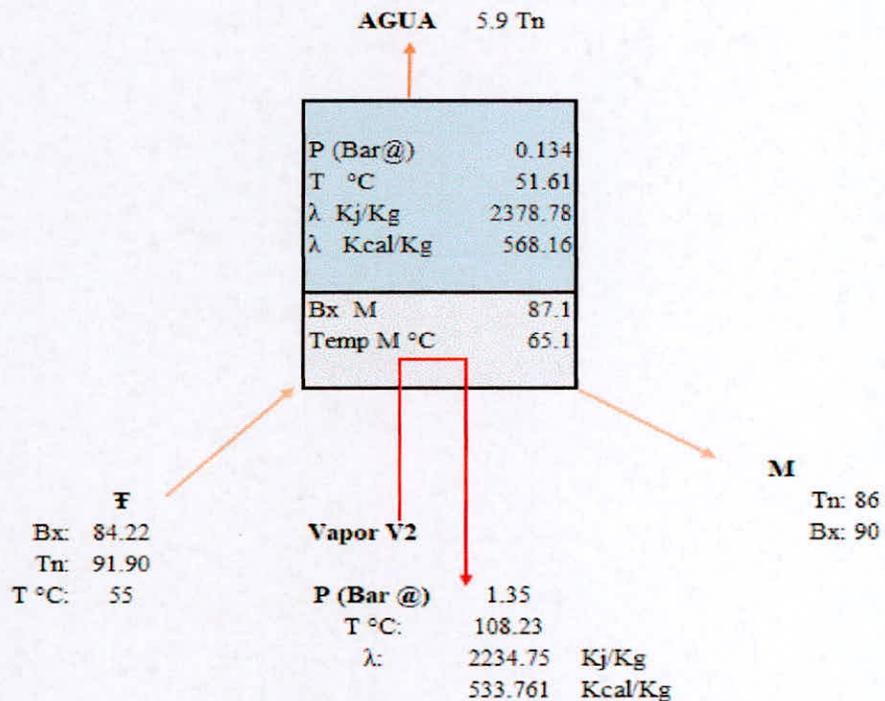


FIGURA N° 43: Balance de Vapor en Tacho Batch B/C

**TABLA N° 9: Consumo de vapor en Tacho Batch B/C**

| <b>Balance de Energia</b>   |       |            |
|-----------------------------|-------|------------|
|                             | U.M   | Valores    |
| Presion en Tacho Batch      | -660  | mmHg       |
|                             | 0.134 | Bar @      |
| <b>Parametros obtenidos</b> |       |            |
| <u>Bx M</u>                 | 84.80 | %          |
| Elevacion Ebullicion        | 11.16 | °C         |
| <u>TM</u>                   | 62.83 | °C         |
| Calor Especifico <u>TM</u>  | 0.49  | Kcal/ Kg°C |
| $\Delta T$                  | 7.83  | °C         |
| <b>Consumo de Vapor</b>     | 7.76  | Tn         |
|                             | 2.22  | Tn/h       |

**B. Consumos de Vapor en el Tacho Batch A/B.** Grafico del Anexo N° 3.

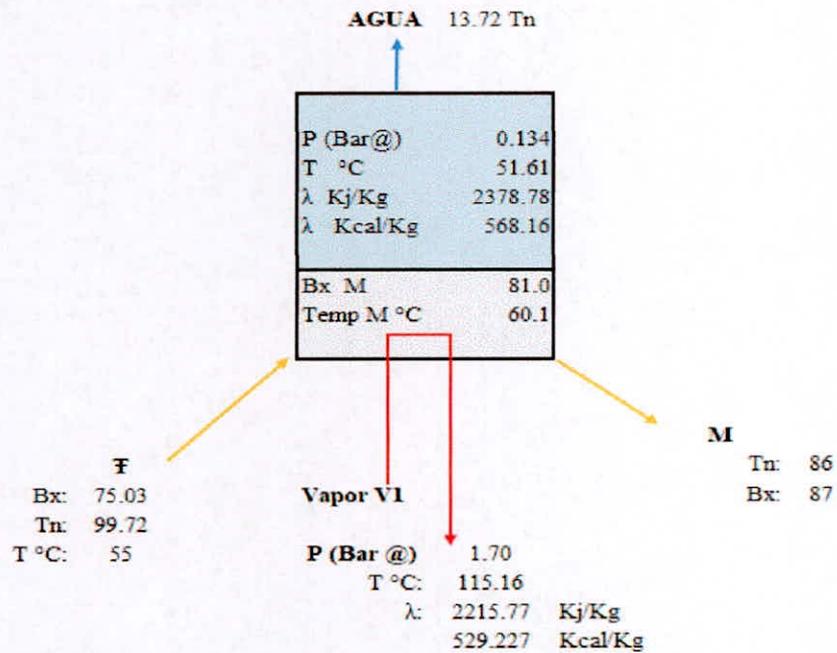


**FIGURA N° 44: Balance de vapor en Tacho Batch A/B**

**TABLA N° 10: Consumo de vapor en Tacho Batch A/B**

| Balance de Energia         |         |            |
|----------------------------|---------|------------|
|                            | Valores | U.M.       |
| Presion en Tacho Batch     | -660    | mmHg       |
|                            | 0.134   | Bar @      |
| Parametros Obtenidos       |         |            |
| <u>Bx M</u>                | 87.11   | %          |
| Elevacion Ebullicion       | 13.52   | °C         |
| <u>TM</u>                  | 65.19   | °C         |
| Calor Especifico <u>TM</u> | 0.48    | Kcal/ Kg°C |
| $\Delta T$                 | 10.19   | °C         |
| Consumo de Vapor           | 7.12    | Tn         |
|                            | 2.03    | Tn/h       |

**C. Consumos de Vapor en Tacho Batch A. Grafico del Anexo N° 4.**



**FIGURA N° 45: Balance de vapor en Tacho Batch A**

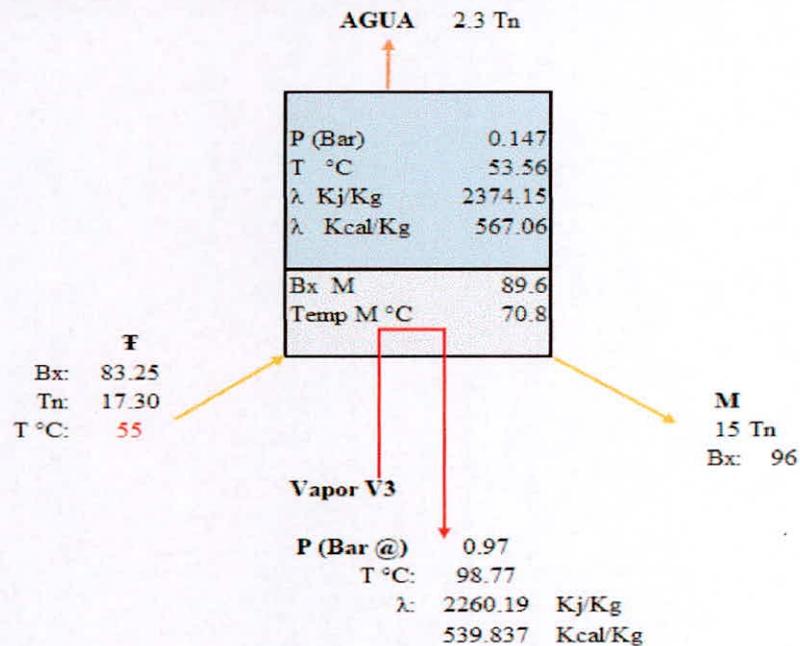
**TABLA N° 11: Consumo de vapor en Tacho Batch A**

| Balance de Energia         |             |             |
|----------------------------|-------------|-------------|
|                            | Valores     | U.M.        |
| Presion en Tacho Batch     | -660        | mmHg        |
|                            | 0.134       | Bar @       |
| Parametros Obtenidos       |             |             |
| <u>Bx M</u>                | 81.01       | %           |
| Elevacion Ebullicion       | 8.53        | °C          |
| <u>TM</u>                  | 60.21       | °C          |
| Calor Especifico <u>TM</u> | 0.51        | Kcal/ Kg°C  |
| $\Delta T$                 | 5.21        | °C          |
| Consumo de Vapor           | 15.24       | Tn          |
|                            | <b>5.08</b> | <b>Tn/h</b> |

**4.6. Cálculo de Consumo de Vapor en los Sistemas de Tachos Continuos.**

Para el cálculo de consumo de vapor en los tachos continuos, aplicar formulas desde 3.50 hasta 3.63.

**A. Consumo de Vapor en Tacho Continuo C. Grafico del Anexo N° 5.**

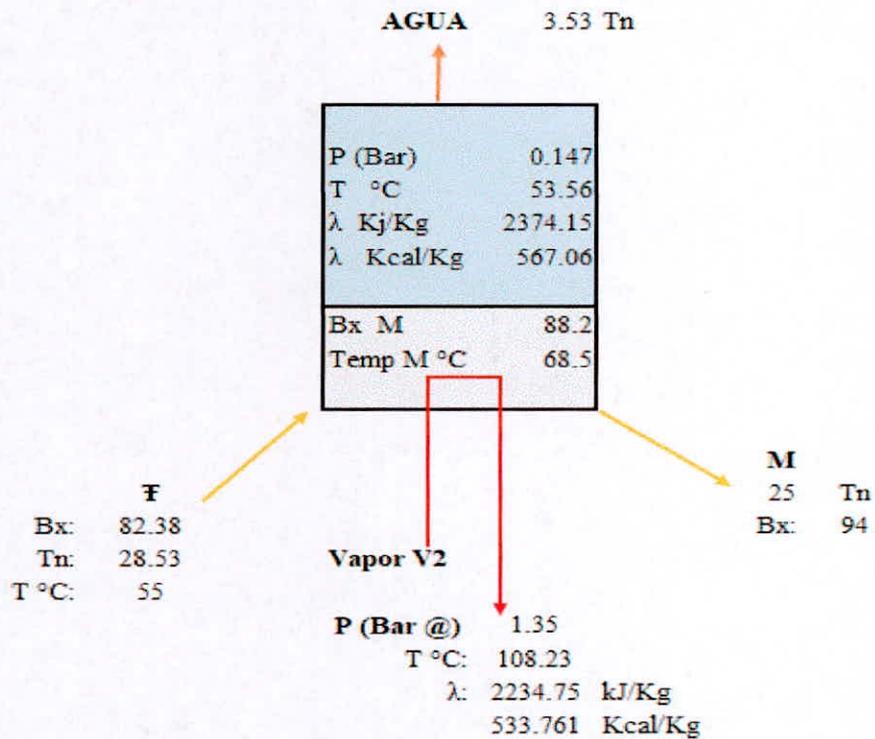


**FIGURA N° 46: Balance de vapor en Tacho Continuo C**

**TABLA N° 12: Consumo de vapor en Tacho continuo C**

| <b>Balance de Energia</b>   |             |             |
|-----------------------------|-------------|-------------|
|                             | Valores     | U.M.        |
| Presion de Trabajo          | -650        | mmHg        |
|                             | 0.147       | Bar @       |
| <b>Parametros Obtenidos</b> |             |             |
| <u>Bx M</u>                 | 89.63       | %           |
| Elevacion Ebullicion        | 17.28       | °C          |
| <u>TM</u>                   | 70.85       | °C          |
| Calor Especifico <u>TM</u>  | 0.46        | Kcal/ Kg°C  |
| $\Delta T$                  | 15.85       | °C          |
| <b>Consumo de Vapor</b>     | <b>2.65</b> | <b>Tn/h</b> |

**B. Consumo de Vapor en Tacho Continuo B. Grafico del Anexo N° 6.**

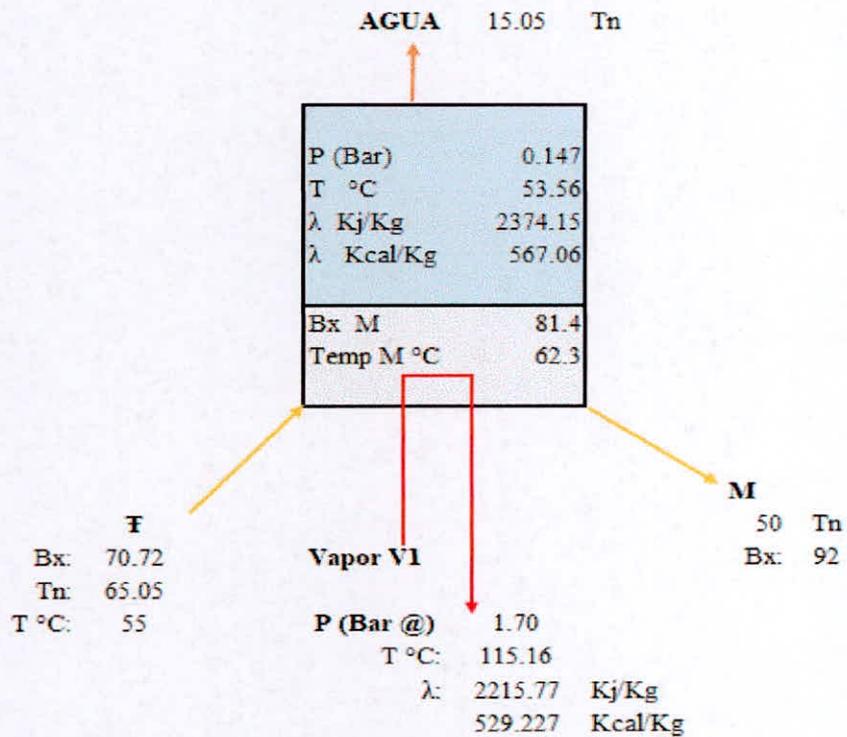


**FIGURA N° 47: Balance de vapor en Tacho Continuo B**

**TABLA N° 13: Consumo de vapor en Tacho continuo B**

| Balance de Energia         |             |             |
|----------------------------|-------------|-------------|
|                            | Valores     | U.M.        |
| Presion de Trabajo         | -650        | mmHg        |
|                            | 0.147       | Bar @       |
| Parametros Obtenidos       |             |             |
| <u>Bx M</u>                | 88.19       | %           |
| Elevacion Ebullicion       | 14.94       | °C          |
| <u>TM</u>                  | 68.51       | °C          |
| Calor Especifico <u>TM</u> | 0.47        | Kcal/ Kg°C  |
| $\Delta T$                 | 13.51       | °C          |
| <b>Consumo de Vapor</b>    | <b>4.09</b> | <b>Tn/h</b> |

**C. Consumo de Masas y de Vapor en Tacho Continuo A. Grafico del Anexo N° 7.**



**FIGURA N° 48: Balance de vapor en Tacho Continuo A**

**TABLA N° 14: Consumo de vapor en Tacho continuo A**

| <b>Balance de Energia</b>   |              |             |
|-----------------------------|--------------|-------------|
|                             | Valores      | U.M.        |
| Presion de Trabajo          | -650         | mmHg@       |
|                             | 0.147        | Bar @       |
| <b>Parametros Obtenidos</b> |              |             |
| <u>Bx M</u>                 | 81.36        | %           |
| Elevacion Ebullicion        | 8.73         | °C          |
| <u>TM</u>                   | 62.30        | °C          |
| Calor Especifico <u>TM</u>  | 0.51         | Kcal/ Kg°C  |
| $\Delta T$                  | 7.30         | °C          |
| <b>Consumo de Vapor</b>     | <b>16.58</b> | <b>Tn/h</b> |

#### 4.7. Consumo de Vapor en los Evaporadores.

Aplicando el Teorema de principio de Riileux y las formulas 3.33; 3.34, y 3.35; hallaremos el agua evaporada en cada efecto y los flujos de consumos.

**TABLA N° 15: Balance de Flujos en los evaporadores**

| <b>Datos en los Evaporadores</b>                  |         |      |
|---|---------|------|
| <b>Datos Generales</b>                            | Valores | U.M. |
| Molienda diaria                                   | 5600    | TCD  |
| Horas efectivas de molienda                       | 23      | h    |
| Flujo de caña                                     | 243.48  | Tn/h |
| Fibra % caña                                      | 14      | %    |
| Horas efectivas de procesos                       | 24      | h    |
| <b>Jugo Claro – Datos de Entrada</b>              |         |      |
| Flujo Jugo claro                                  | 290.5   | Tn/h |
| Brix  | 13.2    | %    |
| Temperatura                                       | 106.5   | °C   |
| Pureza  | 83.7    | %    |
| <b>Jarabe Crudo – Datos Obtenidos a la salida</b> |         |      |
| Flujo de Jarabe crudo                             | 69.67   | Tn/h |
| Brix  | 68.4    | %    |
| Pureza  | 84.12   | %    |

**TABLA N° 16: Parámetros de Vapor en los Evaporadores**

|                | <b>Presión – Bar@</b> | <b>Temperatura - °C</b> | <b>Entalpia – kJ/Kg</b> |
|----------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| Escape         | 2.5                   | 127.42                  | 2181.47                 |
| Primer efecto  | 1.7                   | 115.16                  | 2215.77                 |
| Segundo Efecto | 1.35                  | 108.23                  | 2234.75                 |
| Tercer Efecto  | 0.97                  | 98.77                   | 2260.19                 |
| Cuarto Efecto  | 0.6                   | 85.94                   | 2293.82                 |
| Quinto Efecto  | 0.2                   | 60.07                   | 2358.52                 |

**a. Cálculo Teórico del consumo de vapor – Método de Riileux.**

**TABLA N° 17: Consumos de Vapor en los Efectos de Evaporización**

| <b>Sangrados de Vapor</b>           |                |             |
|-------------------------------------|----------------|-------------|
|                                     | <b>Valores</b> | <b>U.M.</b> |
| <b>Primer Efecto – V1</b>           |                |             |
| Jugo claro – 2do calentamiento      | 4.5            | Tn/h        |
| Tacho Batch A                       | 5.08           | Tn/h        |
| Tacho Continuo A                    | 16.58          | Tn/h        |
| <b>Segundo Efecto – V2</b>          |                |             |
| Jugo colado – 3er calentamiento DCH | 10.11          | Tn/h        |
| Jugo Claro – 1er calentamiento DCH  | 2.68           | Tn/h        |
| Tacho Batch A/B                     | 2.03           | Tn/h        |
| Tacho Continuo B                    | 4.09           | Tn/h        |
| <b>Tercer Efecto – V3</b>           |                |             |
| Jugo Colado – 2do calentamiento     | 8.9            | Tn/h        |
| Jarabe crudo – Calentador DCH       | 2.59           | Tn/h        |
| Tacho Batch B/C                     | 2.22           | Tn/h        |
| Tacho Continuo C                    | 2.65           | Tn/h        |
| Inyectores de vapor a Difusor       | 11.4           | Tn/h        |
| <b>Cuarto Efecto – V4</b>           |                |             |
| Jugo colado – 1er calentamiento     | 8.62           | Tn/h        |
| Jugo mixto – Calentador DCH         | 6.17           | Tn/h        |

LA Tabla N° 17 muestra cuanto es el vapor total consumido por cada efecto, para sus procesos de elaboración de azúcar.

**TABLA N° 18: Balance por el Método Riileux**

| Evaporación en el sistema |     |       |       |       |       | Evaporación/Efecto |        |      |
|---------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|--------------------|--------|------|
| V5                        | X   |       |       |       |       | 5.84               | 5.84   | Tn/h |
| V4                        | X   | 14.79 |       |       |       | 5.84               | 20.63  | Tn/h |
| V3                        | X   | 14.79 | 27.75 |       |       | 5.84               | 48.39  | Tn/h |
| V2                        | X   | 14.79 | 27.75 | 18.92 |       | 5.84               | 67.3   | Tn/h |
| V1                        | X   | 14.79 | 27.75 | 18.92 | 26.16 | 5.84               | 93.46  | Tn/h |
| Perdidas                  | 1 % | 2.06  |       |       |       | Evap. Tot          | 235.63 | Tn/h |

• **Calculo del vapor a condensar**

$$5x + 206.4 = \text{Evaporización}$$

$$5x + 206.4 = 235.63$$

$$x = 5.84$$

En la tabla N° 18 muestra cuanto será el total del agua evaporada del jugo entre los cinco evaporadores teniendo como resultado 235.63 TnA/h, y el agua evaporada por cada uno. Mostrando que necesita en el primer evaporador 93.46 TnV/h vapor de escape para poder evaporar 93.46 TnA/h de agua que tiene el jugo claro. Tales cantidades de agua evaporada serán aprovechadas para los procesos de elaboración de azúcar.

Una vez utilizado y realizado su trabajo el vapor de escape en el primer evaporador; este regresa al Desaireador como vapor condensado como muestra en la figura N° 49.

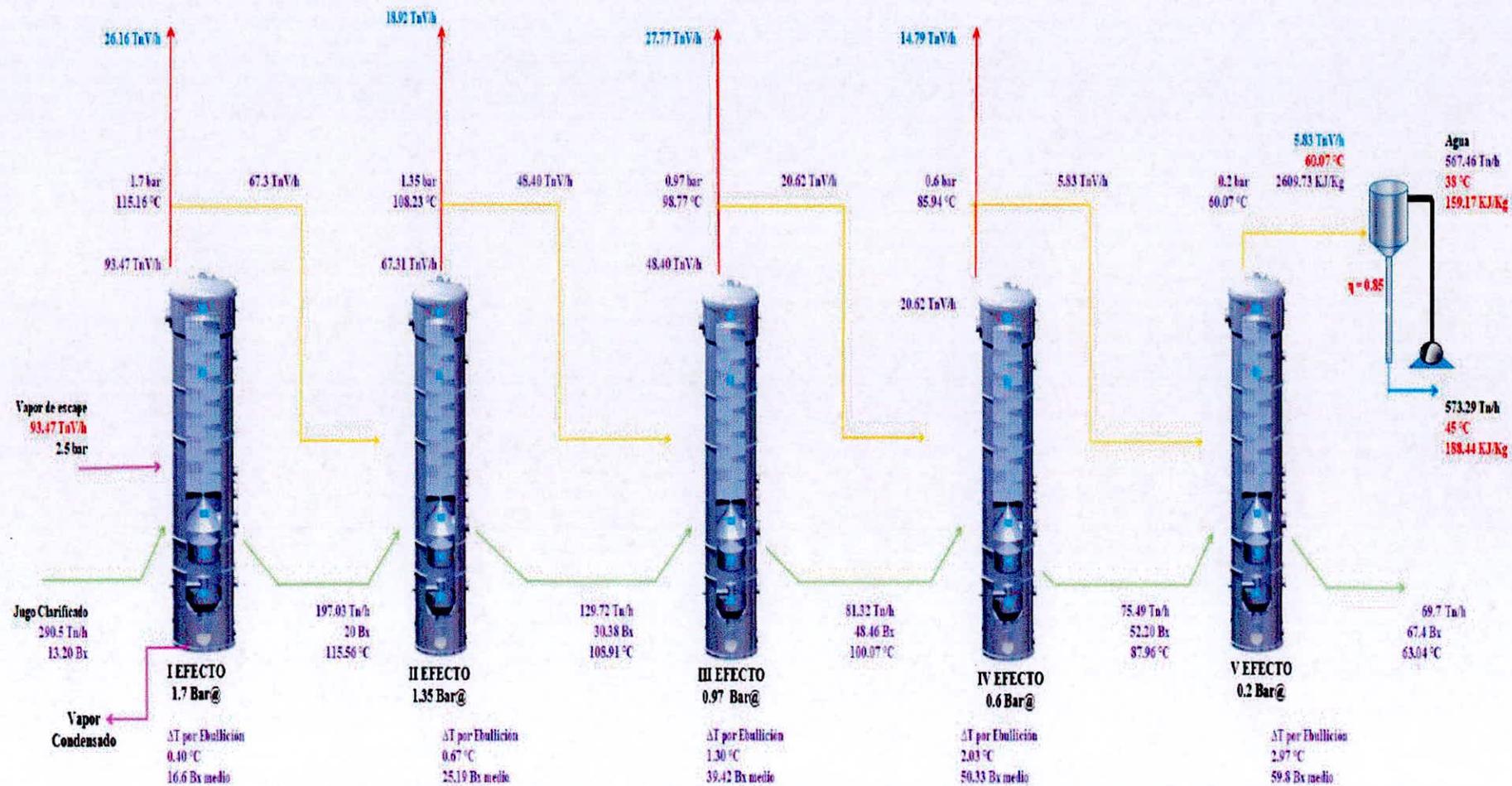


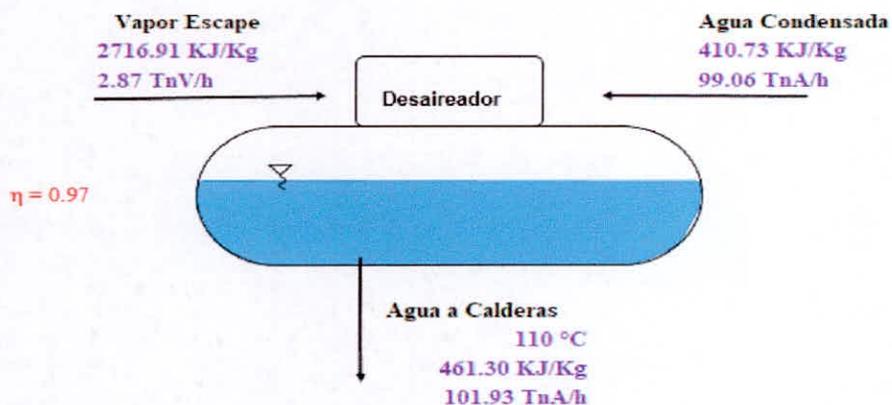
FIGURA N° 49: Diagrama de Flujos en los Evaporadores de Película Descendente

#### 4.8. Consumo de vapor en el Desaireador.

Aplicando las formula del 3.64 y 3.65. Para el cálculo de consumo de vapor.

**TABLA N° 19: Consumo de Vapor en el Desaireador**

| Desaireador                                     |         |       |
|---|---------|-------|
|   | Valores | U.M.  |
| <b>Generador de Vapor</b>                       |         |       |
| Capacidad máxima – Caldera Mitre                | 110     | Tn/h  |
| Demanda Actual – Caldera Mitre                  | 94.31   | Tn/h  |
| <b>Demanda de Agua en el Generador de Vapor</b> |         |       |
| Consumo de Agua – Caldera Mitre                 | 101.93  | Tn/h  |
| Temperatura                                     | 110     | °C    |
| Entalpia  | 461.3   | kJ/Kg |
| <b>Entrada de Agua al Desaireador</b>           |         |       |
| Temperatura                                     | 98      | °C    |
| Entalpia  | 410.73  | kJ/Kg |
| <b>Entrada de Vapor al Desaireador</b>          |         |       |
| Presión   | 2.5     | Bar   |
| Entalpia  | 2716.91 | kJ/Kg |
| <b>Parametros Obtenidos</b>                     |         |       |
| Agua Condensada                                 | 99.06   | Tn/h  |
| Consumo de Vapor Escape                         | 2.87    | Tn/h  |



**FIGURA N° 50: Diagrama de Flujos del Desaireador**

#### 4.9. Consumo de vapor en el Turbogenerador

Primero se realiza un balance de energía eléctrica para saber si realmente cubrimos la demanda eléctrica total del ingenio.

**TABLA N° 20: Balance de Energía Eléctrica del Ingenio Agrolmos**

| Balance de Energía Eléctrica     |        |         |
|----------------------------------|--------|---------|
|                                  | U.M    | Valores |
| Molienda                         | TCD    | 5600    |
| Horas Efectivas                  | h      | 23      |
| Molienda horaria                 | TCH    | 243.48  |
| Ratio de Consumo Energía Fábrica | Kwh/Te | 28.55   |
| Potencia para Fábrica            | Mw     | 6.95    |
| Potencia para Campo              | Mw     | 1.5     |
| Potencia Requerida               | Mw     | 8.45    |
| Potencia del Generador WEG       | Mw     | 7.5     |
| Potencia Total Generada          | Mw     | 6.95    |
| Energía Consumida de Coelvisac   | Mw     | 1.5     |

El valor de 1.5 MW es la potencia requerida que necesitamos para cubrir la demanda eléctrica general del ingenio. Tal valor es el valor más del año 2018, que resulta ser la suma total de Campo A, Campo B y Campo C. Sin embargo, los valores van desde 0.75 MW hasta 1.5 MW, dependiendo del mes del año. Utilizando las formulas del 3.1 al 3.4; hallaremos el consumo de vapor actual en la turbina.

#### Salto Entalpico del Turbogenerador - Calculo de la entalpia Real

$$\eta T = 0.87$$

$$\eta G = 0.9$$

$$\eta_{\text{transmisión}} = 0.88$$

|               |
|---------------|
| Entrada vapor |
| 41.8 bar      |
| 405 °C        |
| 3220.21 Kj/kg |

$$S1 = S2$$

$$S1 = 6.767 \text{ Kj/kg}^\circ\text{C}$$

$$S2 = 6.767 \text{ Kj/kg}^\circ\text{C}$$

$$s_2 = f_{12} + x \cdot s_{12}$$

$$sf2 = 1.621 \text{ Kj/kg}^\circ\text{C}$$

$$sfg = 5.418 \text{ Kj/kg}^\circ\text{C}$$

$$x = 0.95$$

#### Entalpia Real

$$h_2' = h_1 - \eta_T \cdot (h_1 - h_2)$$

$$h_2' = 2700.61 \text{ Kj/kg}$$

|              |
|--------------|
| Salida vapor |
| 2.6 bar      |
| 135 °C       |

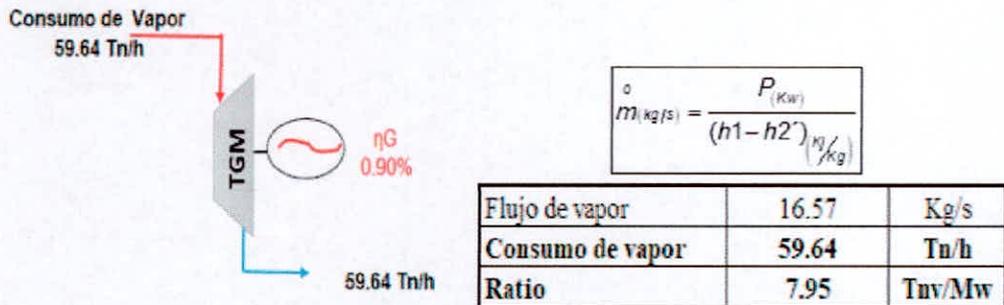
$$h_2 = h_{f2} + x \cdot h_{fg2}$$

$$hf2 = 540.9 \text{ Kj/kg}$$

$$hfg = 2177.3 \text{ Kj/kg}$$

$$h_2 = 2608.92 \text{ Kj/kg}$$

### Calculo de Consumo de Vapor



#### 4.10. Consumo de agua en el Atemperador.

Ya que la turbina inyecta solo 59.64 TnV/h de 97.39 TnV/h que es la demanda total de consumo de vapor para procesos, los 33.74 TnV/h de vapor restantes es enviada por reductoras de presión; y enfriada por atemperadores a condiciones necesarias, consumiendo 4 TnA/h de agua total, entre el atemperador N°1 y N°2.

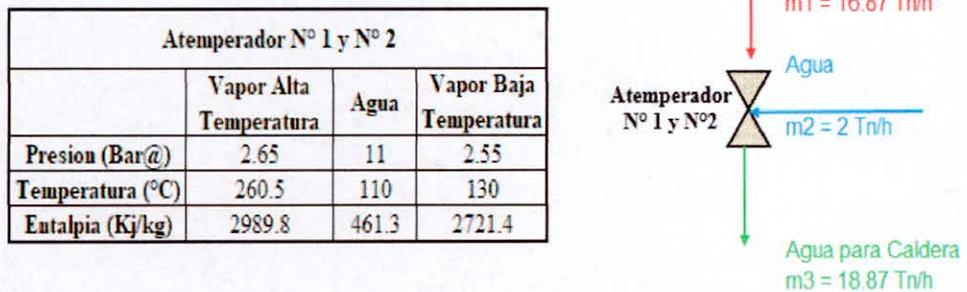


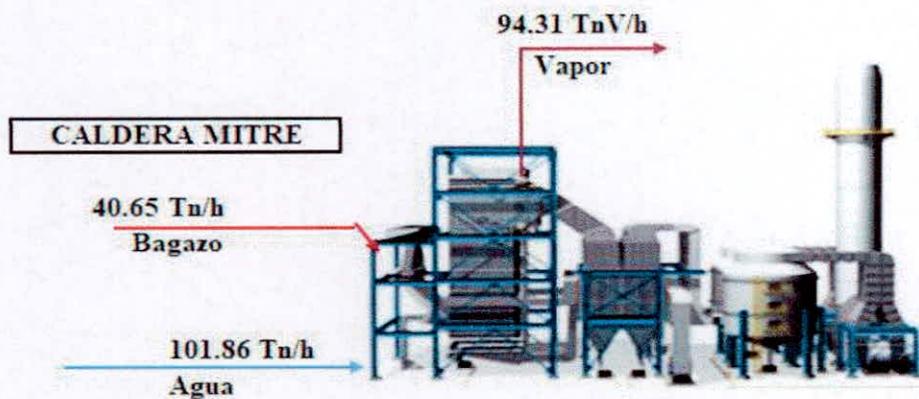
FIGURA N° 51: Diagrama de flujos en el atemperador 1 y 2

#### 4.11. Calculo de la Eficiencia en los Generadores de Vapor por el Método Directo.

Una vez realizado los balances en el área de procesos y obtenido la demanda total de consumo de vapor de la caldera. Se estima los consumos de agua; de bagazo y también de la eficiencia del generador de vapor, para hallar la energía térmica aprovechada por parte del generador de vapor y energía térmica suministrada del bagazo respecto a su humedad.

**TABLA N° 21: Eficiencia del generador de vapor**

| <b>Composicion Del Bagazo - 50 % Humedad</b>    |         |          |         |       |
|---|---------|----------|---------|-------|
|   |         | Valores  | U.M.    |       |
| Carbono   | C       | 19.500   | %       |       |
| Azufre  | S       | 0.019    | %       |       |
| Hidrógeno                                       | H2      | 3.100    | %       |       |
| Nitrógeno                                       | N       | 0.280    | %       |       |
| Agua  | H2O     | 50.000   | %       |       |
| Oxígeno   | O2      | 25.40    | %       |       |
| Ceniza  | Ceniza  | 1.700    | %       |       |
|   | Total   | 100.00   | %       |       |
| Sacarosa  |         | 1.00     | %       |       |
| <b>Datos de Entalpia</b>                        |         |          |         |       |
| Generacion de Vapor                             | 46 Bar@ | 415 °C   | 3239.97 | kJ/kg |
| Alimentacion de Agua                            | 115 °C  |          | 461.3   | kJ/kg |
| Ratio de produccion                             | 3.32    |          | Tnv/Tnb |       |
| <b>Poderes Calorificos Obtenidos del Bagazo</b> |         |          |         |       |
| Poderes Calorifico Superior                     |         | 9438.075 | kJ/Kg   |       |
| Poderes Calorificos Inferior                    |         | 7567.94  | kJ/Kg   |       |
| <b>Eficiencias del Generador de Vapor</b>       |         |          |         |       |
| Eficiencia con el PCS                           |         | 68.3     | %       |       |
| Eficiencia con el PCI                           |         | 85.18    | %       |       |



**FIGURA N° 52: Esquema de Producción de Vapor del Generador**

### 4.12. Balance de Vapor Actual del Ingenio Agrolmos.

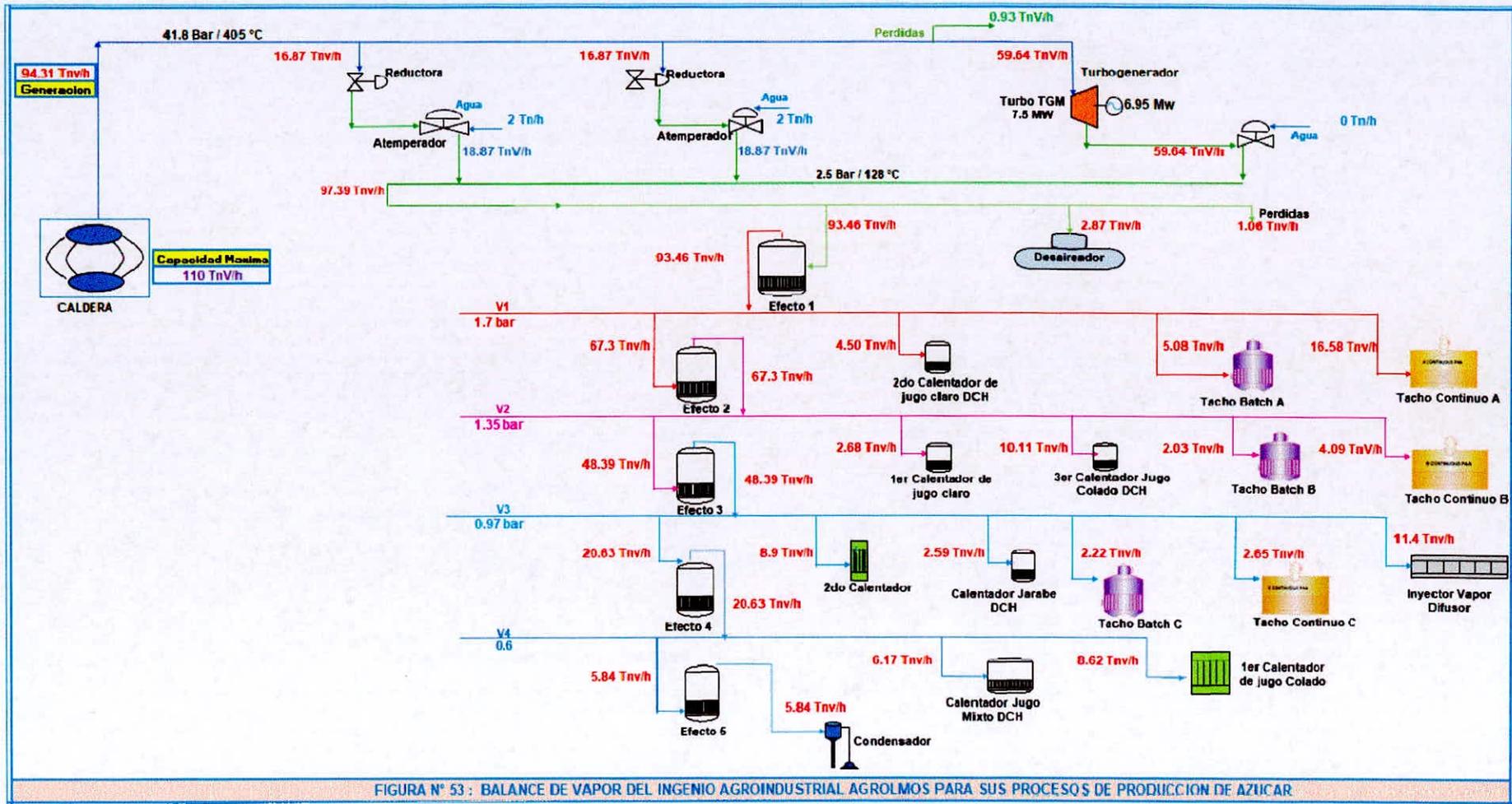


FIGURA N° 53 : BALANCE DE VAPOR DEL INGENIO AGROINDUSTRIAL AGROLMOS PARA SUS PROCESOS DE PRODUCCION DE AZUCAR

### 4.13. Balance de Vapor y Energía Actual del Ingenio Agrolmos

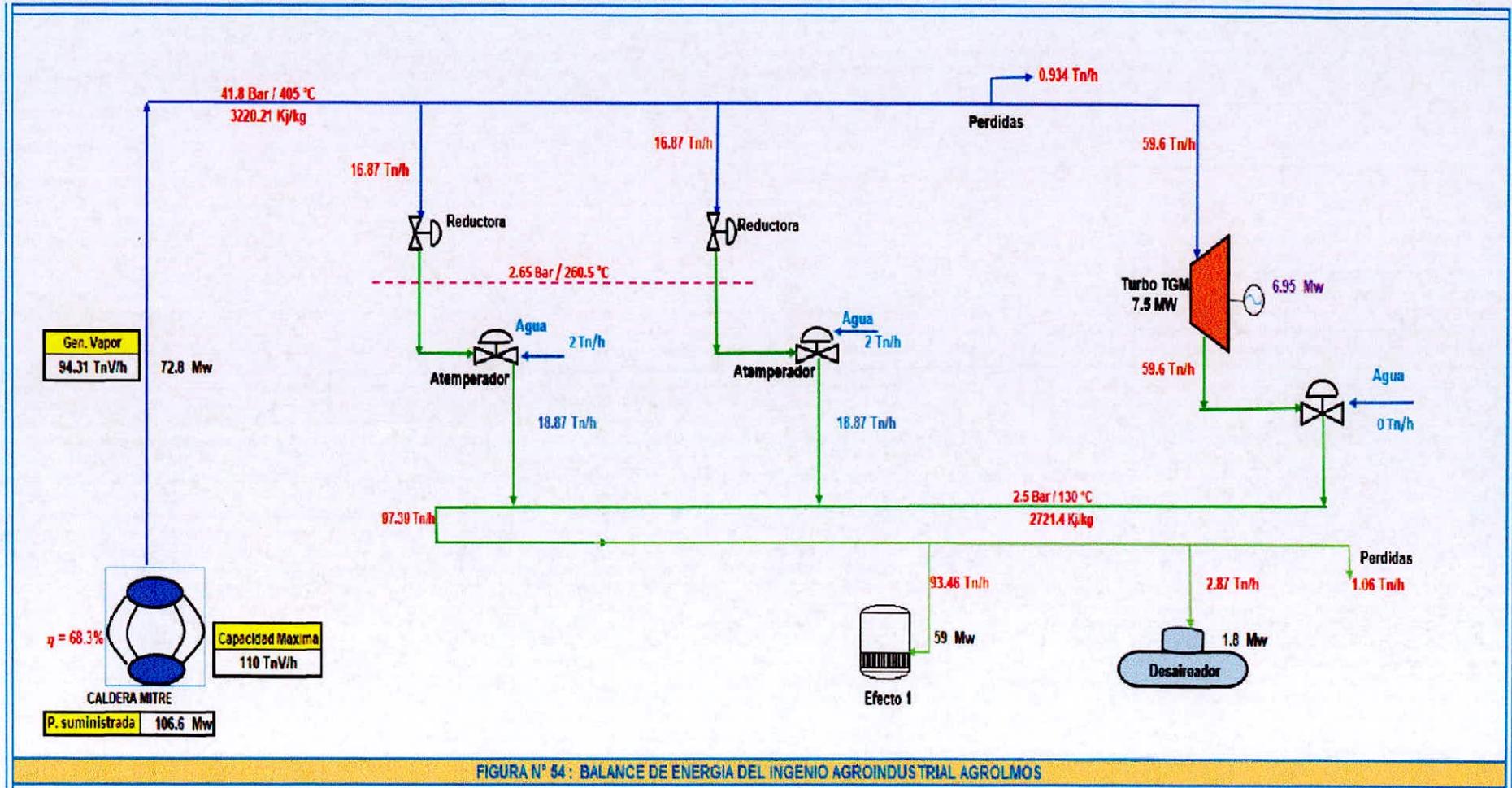


FIGURA N° 54 : BALANCE DE ENERGIA DEL INGENIO AGROINDUSTRIAL AGROLMOS

#### 4.14. Esquema Resumen Actual en el Ingenio Agrolmos.

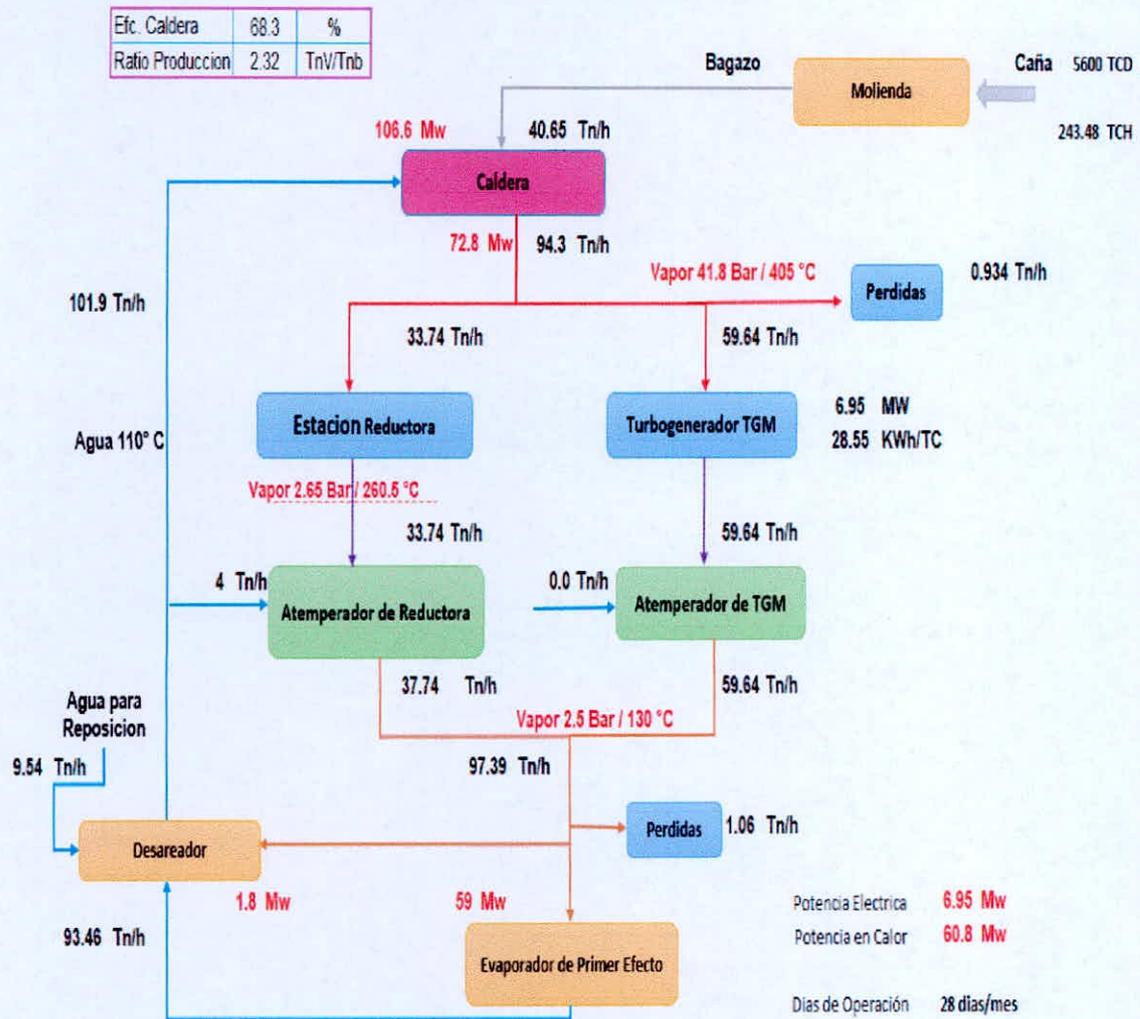
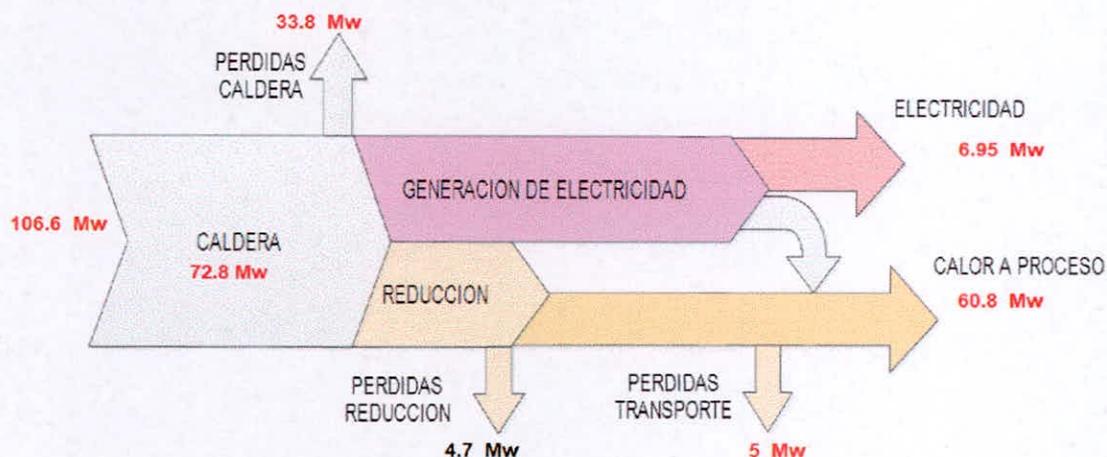


FIGURA N° 55: Balance Masa y Energía Actual del ingenio Agrolmos

TABLA N° 22: Indicadores Actuales de Cogeneración

|   |      |         |
|---|------|---------|
| <b>Eficiencia de planta</b>                 | 63.3 | %       |
| <b>Factor de carga de la caldera</b>        | 0.88 | %       |
| <b>Heat Rate</b>                            | 5.85 | tmb/Mwh |
| <b>Relacion de cogeneracion "C"</b>         | 0.12 |         |
| <b>Rendimiento electrico efectivo "REE"</b> | 0.27 |         |



**FIGURA N° 56: Balance Energético del Ingenio Agrolmos**

**TABLA N° 23: Balance Mensual Actual del Ingenio Agrolmos**

| RESUMEN DE BALANCE DE MASA Y ENERGIA           |         |         |
|--|---------|---------|
| TCD  | Tn/día  | 5,600   |
| Caña Molida al mes                             | Tn/mes  | 156,800 |
| Bagazo disponible                              | Tn/mes  | 42,716  |
| Bagazo sobrante                                | Tn/mes  | 15,398  |
| Molienda                                       | Dias    | 28      |
| Bagazo quemado total                           | Tn/mes  | 27,318  |
| Vapor Generador - Consumo Planta               | Tnv/mes | 63,378  |
| Energía Generada TGM - Consumo Planta          | MWh/mes | 4,671   |
| <b>Concesionaria Coelvisac - Consumo Campo</b> |         |         |
| Coelvisac - Potencia                           | KW/mes  | 1,500   |
| Coelvisac - Energía HP                         | MWh/mes | 185     |
| Coelvisac - Energía HFP                        | MWh/mes | 900     |

Se detecta un déficit de uso de la energía al enviar aproximadamente el 40% del vapor generado hacia las reductoras de presión, perdiendo así el flujo potencia térmica. Este déficit ocurre ya que el vapor saliente del Turbogenerador no cubre en su totalidad la demanda de vapor que necesita el ingenio para sus procesos.

#### 4.15. Proyecto Venta de Energía – Nuevo Turbogenerador

##### Turbina de Condensación y Extracción. Marca Triveni 22.3 Mw.

Ya que el generador de vapor no trabaja a su máxima capacidad y tiene un factor de carga de 0.88. Se propone generar 108 TnV/h de vapor para elevar el factor de carga y así generar la máxima potencia eléctrica; esto se logrará también eliminando el uso de estranguladores de presión. De este modo se realiza el cálculo; para estimar cual sería la generación eléctrica máxima del nuevo turbogenerador.

##### Salto entalpico del turbogenerador - Cálculo de la Entalpia Real

|               |
|---------------|
| Entrada vapor |
| 41.80 bar     |
| 405.00 °C     |
| 3220.21 Kj/kg |

|              |
|--------------|
| Salida vapor |
| 2.60 bar     |
| 135.00 °C    |

$\eta_T = 0.95$        $\eta_G = 0.95$        $\eta_{transmisión} = 0.9$

$S_1 = S_2$   
 $S_1 = 6.767 \text{ Kj/kg}^\circ\text{C}$   
 $S_2 = 6.767 \text{ Kj/kg}^\circ\text{C}$

$$S_2 = f_{r2} + x \cdot S_{fg3}$$

$sf_2 = 1.621 \text{ Kj/kg}^\circ\text{C}$   
 $s_{fg} = 5.418 \text{ Kj/kg}^\circ\text{C}$   
 $x = 0.95$

$$h_2 = h_{r2} + x \cdot h_{fg3}$$

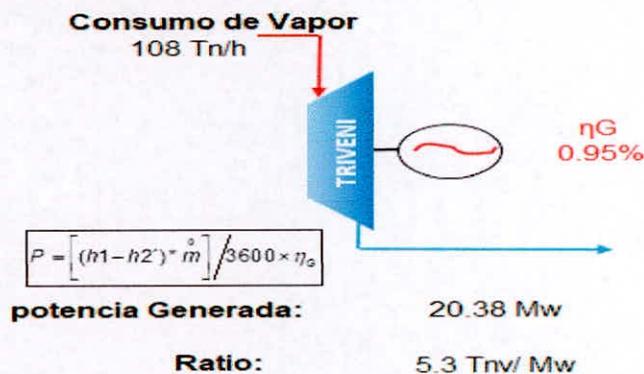
$hf_2 = 540.90 \text{ Kj/kg}$   
 $h_{fg} = 2177.30 \text{ Kj/kg}$   
 $h_2 = 2608.92 \text{ Kj/kg}$

**Entalpia Real**

$$h_2' = h - \eta_T \cdot (h_1 - h_2)$$

$h_2' = 2639.5 \text{ Kj/kg}$

##### Calculo de Potencia Generada

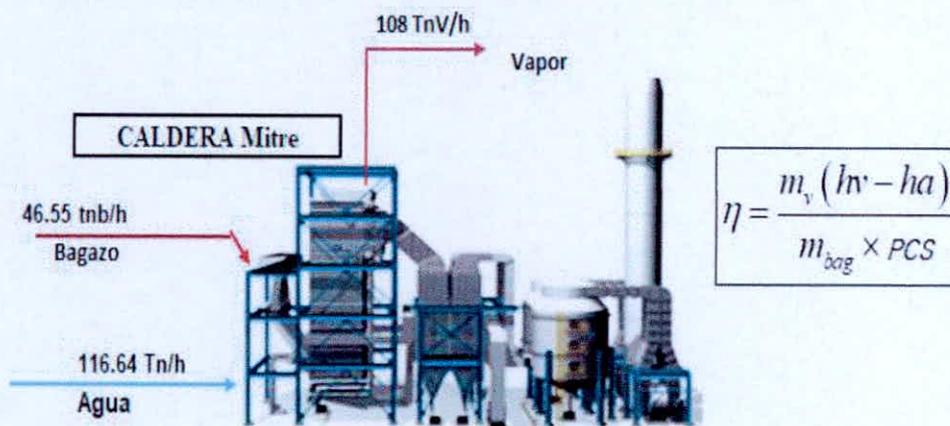


#### 4.16. Consumo de Flujos en el generador de vapor para nuevo turbogenerador

Ya que se desea generar 108 TnV/h de vapor; para generar la máxima potencia eléctrica. Se debe tener en cuenta que los flujos de consumo en el generador de vapor también aumentaran; por lo que realiza hace un balance de consumos.

**TABLA N° 24: Indicador de Eficiencias del Generador de Vapor**

| Composicion Del Bagazo - 50 % Humedad    |         |          |         |
|--|---------|----------|---------|
|  |         | Valores  | U.M.    |
| Carbono                                  | C       | 19.500   | %       |
| Azufre                                   | S       | 0.019    | %       |
| Hidrógeno                                | H2      | 3.100    | %       |
| Nitrógeno                                | N       | 0.280    | %       |
| Agua                                     | H2O     | 50.000   | %       |
| Oxigeno                                  | O2      | 25.40    | %       |
| Ceniza                                   | Ceniza  | 1.700    | %       |
|  | Total   | 100.00   | %       |
| Sacarosa                                 |         | 1.00     | %       |
| Datos de Entalpia                        |         |          |         |
| Generacion de Vapor                      | 46 Bar@ | 415 °C   | 3239.97 |
| Alimentacion de Agua                     |         |          | 115 °C  |
|  |         |          | 461.3   |
| Ratio de produccion                      |         |          | 2.17    |
|  |         |          | Tnv/Tnb |
| Poderes Calorificos Obtenidos del Bagazo |         |          |         |
| Poderes Calorifico Superior              |         | 9438.075 | kJ/Kg   |
| Poderes Calorificos Inferior             |         | 7567.94  | kJ/Kg   |
| Eficiencias del Generador de Vapor       |         |          |         |
| Eficiencia con el PCS                    |         | 68.3     | %       |
| Eficiencia con el PCI                    |         | 85.18    | %       |



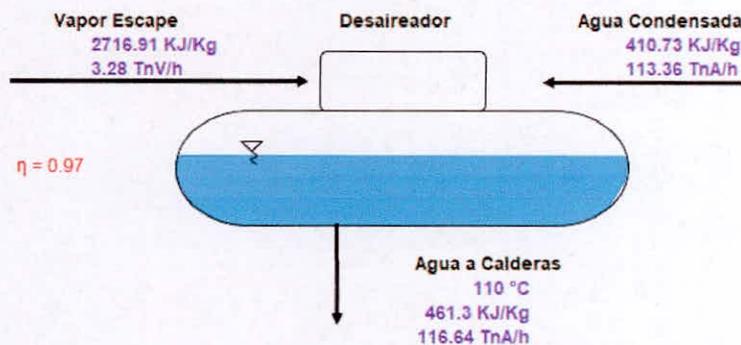
**FIGURA N° 57: Flujos de Consumo en el Generador de vapor**

#### 4.17. Consumo de Vapor en el Desaireador

Al aumentar la generación de vapor aumenta, también aumenta el flujo de consumo de agua y vapor en el Desaireador. Ya que el Desaireador es el encargado principal de abastecer al generador de vapor. Se realiza un balance de flujos de entrada al sistema.

**TABLA N° 25: Consumo de vapor en Desaireador-Nvo. Turbogenerador**

| Parámetros de Consumo del Desaireador           |         |       |
|---|---------|-------|
|   | Valores | UM.   |
| <b>Generador de Vapor</b>                       |         |       |
| Capacidad máxima – Caldera Mitre                | 110     | Tn/h  |
| Demanda Actual – Caldera Mitre                  | 108.00  | Tn/h  |
| <b>Demanda de Agua en el Generador de Vapor</b> |         |       |
| Consumo de Agua – Caldera Mitre                 | 116.64  | Tn/h  |
| Temperatura                                     | 110     | °C    |
| Entalpia  | 461.3   | kJ/Kg |
| <b>Entrada de Agua al Desaireador</b>           |         |       |
| Temperatura                                     | 98      | °C    |
| Entalpia  | 410.73  | kJ/Kg |
| <b>Entrada de Vapor al Desaireador</b>          |         |       |
| Presión   | 2.5     | Bar   |
| Entalpia  | 2716.91 | kJ/Kg |
| <b>Parametros Obtenidos</b>                     |         |       |
| Consumo de Agua Condensada                      | 113.36  | Tn/h  |
| Consumo de Vapor Escape                         | 3.28    | Tn/h  |



**FIGURA N° 58: Flujos en el Desaireador**

#### 4.18. Balance de Vapor y Energía del Ingenio Agroindustrial Agrolmos.

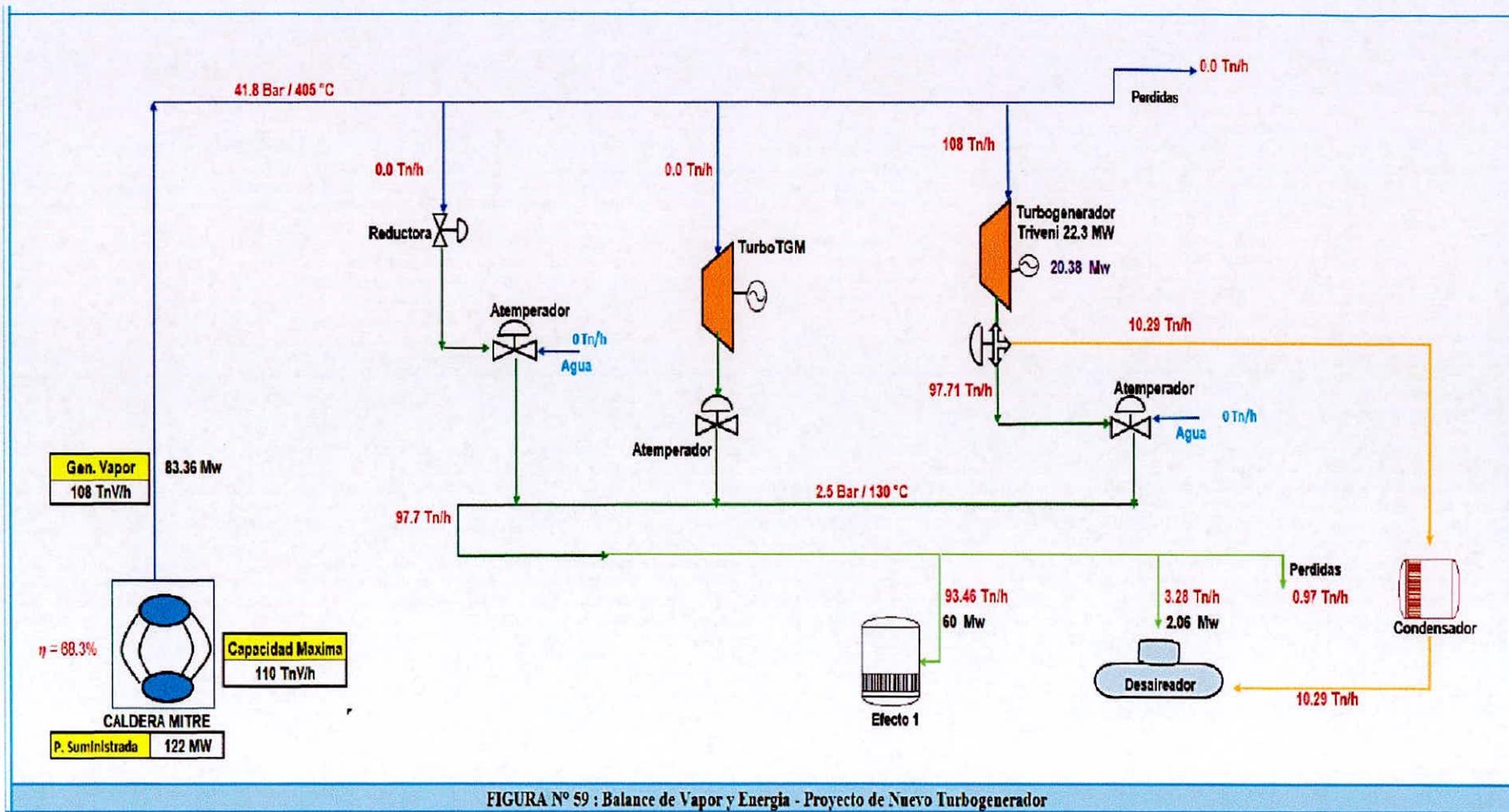
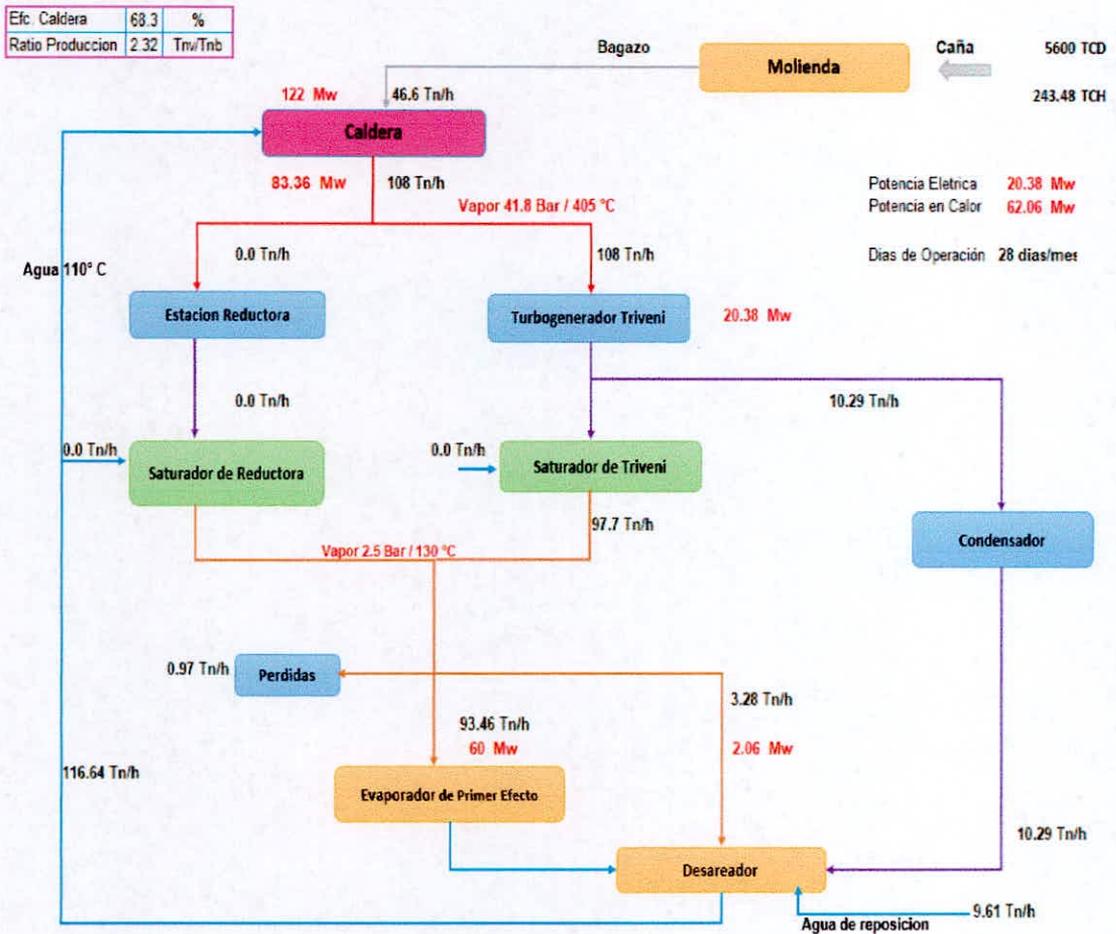


FIGURA N° 59 : Balance de Vapor y Energía - Proyecto de Nuevo Turbogenerador

#### 4.19. Esquema resumen con el Nuevo Turbogenerador

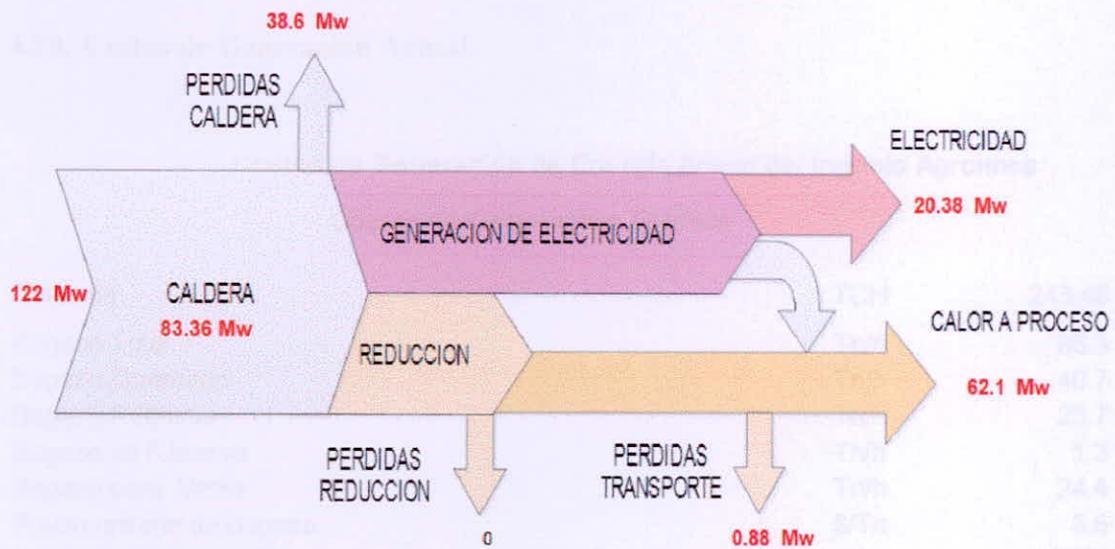


**FIGURA N° 60: Balance Masa y Energía - Nuevo Turbogenerador**

**TABLA N° 26: Indicadores de Calificación con Nuevo Turbogenerador**

|   |       |         |
|---|-------|---------|
| <b>Eficiencia de planta</b>                 | 67.55 | %       |
| <b>Factor de carga la Caldera</b>           | 0.98  | %       |
| <b>Heat Rate</b>                            | 2.28  | Tnb/Mwh |
| <b>Relacion de cogeneracion "C"</b>         | 0.33  |         |
| <b>Rendimiento electrico efectivo "REE"</b> | 0.39  |         |

Con un valor de 0.39 en el indicador REE, se logra calificar para la venta de energía eléctrica.



**FIGURA N° 61: Balance Energético - Nuevo Turbogenerador**

**TABLA N° 27: Balance Mensual con Nuevo Turbogenerador**

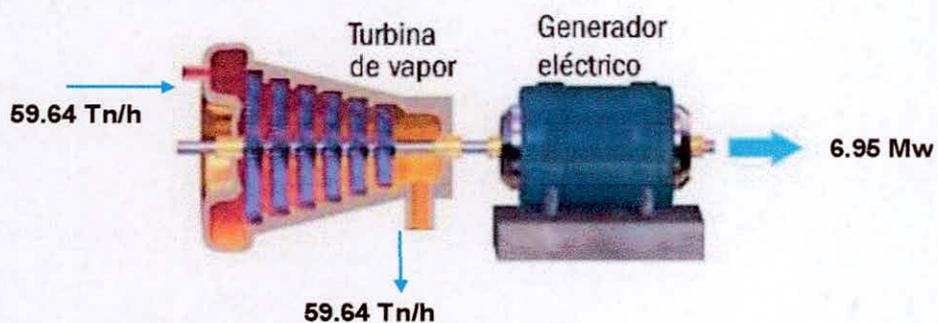
| RESUMEN DE BALANCE DE MASA Y ENERGIA           |            |         |          |
|--|------------|---------|----------|
| TCD  |            | Tn/día  | 5,600    |
| Caña Molida al mes                             |            | Tn/mes  | 156,800  |
| Bagazo disponible                              |            | Tn/mes  | 42,716   |
| Bagazo sobrante                                |            | Tn/mes  | 11,434   |
| Molienda                                       |            | Dias    | 28       |
| Bagazo quemado total                           |            | Tn/mes  | 31,283   |
| Vapor Generador                                |            | Tn/mes  | 72,576   |
| Energia Para Planta                            | - 9 Mw     | MWh/mes | 6,048    |
| Energia Para venta                             | - 11.38Mw  | MWh/mes | 7,644.9  |
| Energia Generada Triveni                       | - 20.38 Mw | MWh/mes | 13,692.9 |
| <b>Concesionaria Coelvisac - Consumo Campo</b> |            |         |          |
| Coelvisac - Potencia                           |            | KW/mes  | -        |
| Coelvisac - Energia HP                         |            | MWh/mes | -        |
| Coelvisac - Energia HFP                        |            | MWh/mes | -        |

### Costo de Generacion Electrica

|                                   |       |       |
|-----------------------------------|-------|-------|
| Energía Eléctrica Generada        | Mw    | 6.95  |
| Porcentaje de Energía de Calderas | %     | 9.55  |
| Costo Total de Generación         | \$    | 13.97 |
| Costo unitario de Generación      | \$/Mw | 2.01  |

### Consumo de Energía Externa - coelvisac

|                                  |          |        |               |
|----------------------------------|----------|--------|---------------|
| Precio de Potencia de Compra     | (precio) | \$/Kwh | 6.82          |
| Precio de Energía de Compra      | (precio) | \$/Mw  | 24.64         |
| Potencia de Coelvisac            | (Mes)    | Kw     | 1500          |
| Energía HP                       | (Mes)    | Mwh    | 185           |
| Energía HFP                      | (Mes)    | Mwh    | 900           |
| Costo Total de Compra de Energía | (Mes)    | \$     | <b>43,618</b> |



### Costos Generales de Generacion Electrica

|                                  |       |       |
|----------------------------------|-------|-------|
| Costo Total de Energía Eléctrica | \$    | 13.97 |
| Costo Unitario de Generación     | \$/Mw | 2.01  |

El valor de \$ **43,618** que se paga mensualmente por consumo de energía eléctrica, es el valor más elevado que se tomó del 2018, lo cual lo tomamos como un costo y pérdida mensual económicamente.

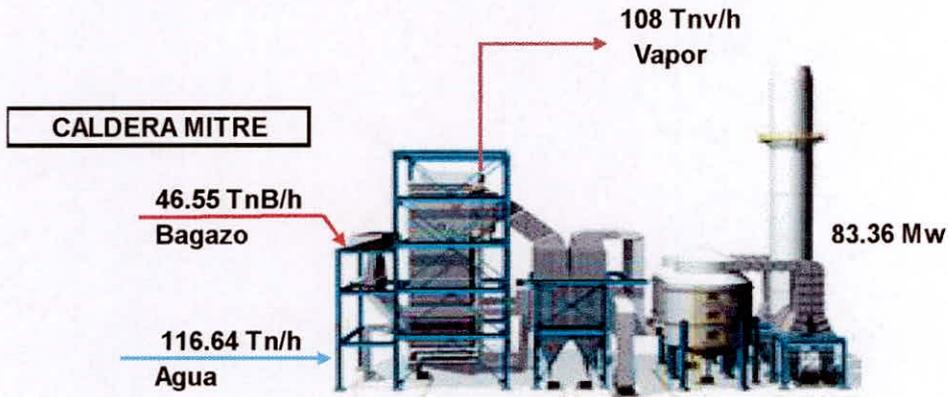
**TABLA N° 28: Costos e Ingresos Actuales sin Venta de Energía Eléctrica**

| Costos e Ingresos de Generacion de Energia |                |                   |                |                   |
|--|----------------|-------------------|----------------|-------------------|
|  | Hora           | Día               | Mes            | Año               |
| Costos de Energía Eléctrica                | -\$13.97       | -\$321.42         | -\$8,999.79    | -\$106,068.91     |
| Costo de Operación y Mantenimiento         | -\$1.40        | -\$32.14          | -\$899.98      | -\$10,606.89      |
| Costo de Consumo de Energía - Coelvisac    |                |                   | -\$43,617.99   | -\$523,415.90     |
| Ingreso por Venta de Bagazo                | \$87.82        | \$2,019.81        | \$56,554.74    | \$666,537.97      |
| <b>Total de Ingresos</b>                   | <b>\$72.45</b> | <b>\$1,666.25</b> | <b>\$3,037</b> | <b>\$26,446.3</b> |

#### 4.21. Costos de Generación con Venta de Energía Eléctrica a la Red

##### Costo de Generacion Termica

|                                    |       |        |
|------------------------------------|-------|--------|
| Molienda                           | Tn/h  | 243.48 |
| Bagazo Total                       | Tn/h  | 66.3   |
| Bagazo Quemado                     | Tn/h  | 46.55  |
| Bagazo Restante                    | Tn/h  | 19.8   |
| Bagazo de Reserva                  | Tn/h  | 1.3    |
| Bagazo para Venta                  | Tn/h  | 18.5   |
| Precio unitario de Bagazo          | \$/Tn | 3.6    |
| Ingreso por Venta de Bagazo        | \$/h  | 66.6   |
| Costo de Operación y Mantenimiento | %     | 10     |



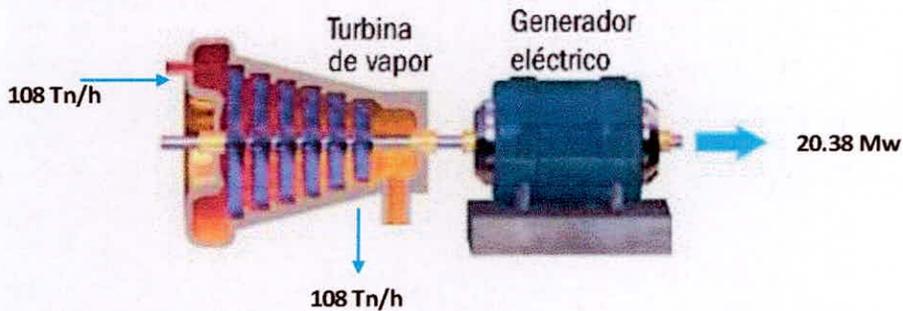
|                              |       |       |
|------------------------------|-------|-------|
| Energía Generada             | Mw    | 83.36 |
| Bagazo Consumido             | Tn    | 46.55 |
| Costo de Generación          | \$    | 167.6 |
| Costo unitario de generación | \$/Mw | 2.01  |
| Vapor Generado               | Tn    | 108   |
| Costo unitario de Vapor      | \$/Tn | 1.55  |

##### Costos Generales de Generacion Térmica

|                              |       |       |
|------------------------------|-------|-------|
| Costo Unitario de Generación | \$/Mw | 2.01  |
| Costo Unitario de Vapor      | \$/Tn | 1.55  |
| Costo Total de Energía       | \$    | 167.6 |

### Costo de Generación Eléctrica

|   |       |       |
|---|-------|-------|
| Energía Eléctrica Generada                        | Mw    | 20.38 |
| Porcentaje de Energía de Calderas                 | %     | 24.44 |
| Costo Total de Generación                         | \$    | 40.96 |
| Costo unitario de Generación                      | \$/Mw | 2.01  |
| Potencia Consumo del Ingenio                      | Mw    | 9     |
| Potencia para venta                               | Mw    | 11.38 |
| Precio por venta de Potencia (Contrato bilateral) | \$/Mw | 45.5  |
| Ingreso de Venta Energía                          | \$    | 517.8 |



|                                  |       |       |
|----------------------------------|-------|-------|
| Costo Total de Energía Eléctrica | \$    | 40.96 |
| Costo Unitario de Generación     | \$/Mw | 2.01  |

Con el nuevo turbogenerador cubrimos la demanda total del ingenio y generamos excedentes 11.38 Mw para venta de energía eléctrica, por lo cual no se consume energía eléctrica externa.

El valor de **45.5 \$/Mw** para la venta de energía, es un valor tomado de la empresa Agroaurora; ya que ellos venden energía eléctrica con **contrato bilateral**.

**TABLA N° 29: Costos e Ingresos Con Venta de Energía Eléctrica**

| Costos e Ingresos de Generación de Energía |                 |                    |                  |                    |
|--|-----------------|--------------------|------------------|--------------------|
|  | Hora            | Día                | Mes              | Año                |
| Costos de Energía Eléctrica                | -\$40.96        | -\$983.15          | -\$29,495        | -\$324,440         |
| Costo de Operación y Mantenimiento         | -\$4.10         | -\$98.32           | -\$2,949         | -\$32,444          |
| Ingreso por Venta de Energía               | \$517.79        | \$12,427           | \$372,809        | \$4,100,897        |
| Ingreso por Venta de Bagazo                | \$66.6          | \$1,531            | \$42,873         | \$505,293          |
| <b>Beneficio</b>                           | <b>\$539.30</b> | <b>\$12,876.68</b> | <b>\$383,238</b> | <b>\$4,249,305</b> |

El indicador “Costo de Energía Eléctrica” se toma como egresos, esto representa el fondo para los mantenimientos anuales en el área de generación. Y “Costo de operación y mantenimientos” el gasto acumulado y realizado mensual y anual.

## 4.22. Evaluación Económica

### A. Parámetros Económicos

**Inversión Inicial:** \$ 4,813,944

**Tasa Interés:** 12 %

**Vida Útil:** 30 años

| Flujo de Ingresos |              |
|-------------------|--------------|
| Año               | A            |
| 1                 | \$ 4,606,189 |
| 2                 | \$ 4,606,189 |
| 3                 | \$ 4,606,189 |
| 4                 | \$ 4,606,189 |
| 5                 | \$ 4,606,189 |
| 6                 | \$ 4,606,189 |
| 7                 | \$ 4,606,189 |
| 8                 | \$ 4,606,189 |
| 9                 | \$ 4,606,189 |
| 10                | \$ 4,606,189 |

| Flujo de Egresos |              |
|------------------|--------------|
| Año              | B            |
| 1                | \$ 356,884.5 |
| 2                | \$ 676,884.5 |
| 3                | \$ 356,885.5 |
| 4                | \$ 676,885.5 |
| 5                | \$ 356,886.5 |
| 6                | \$ 676,886.5 |
| 7                | \$ 356,887.5 |
| 8                | \$ 676,887.5 |
| 9                | \$ 356,888.5 |
| 10               | \$ 676,888.5 |

| Flujo Efectivo Neto |              |
|---------------------|--------------|
| Año                 | A-B          |
| 1                   | \$ 4,249,305 |
| 2                   | \$ 3,929,305 |
| 3                   | \$ 4,249,304 |
| 4                   | \$ 3,929,304 |
| 5                   | \$ 4,249,303 |
| 6                   | \$ 3,929,303 |
| 7                   | \$ 4,249,302 |
| 8                   | \$ 3,929,302 |
| 9                   | \$ 4,249,301 |
| 10                  | \$ 3,929,301 |

Se realiza un cálculo de Van a 10 años; solo para ver si la inversión es rentable. En los flujos de egresos cada dos años aumenta; ya que por recomendación de los expertos se debe abrir la turbina, reductor y generador; para realizar un mantenimiento general interno y cambiar algunas piezas críticas.

El flujo de Ingresos se toma de la Tabla N° 29. Ingresos por parte de venta de bagazo y energía, de igual forma los egresos la suma de costo de energía eléctrica con operación y mantenimiento.

#### a) Hallando el Valor Actual Neto "VAN":

**VAN:** \$ 18,342,704

#### b) Hallando Tasa de Interés Retorno "TIR"

**TIR:** 85.77%

#### c) Hallando Pay Back:

**Pay Back:** 1.2 Años (14 Meses)

## 5. Discusión de Resultados

Referente a los textos de consulta con sus antecedentes y a los indicadores actuales del ingenio.

- Actualmente el ingenio azucarero Agrolmos presenta una eficiencia de planta de 63.3%. Con la implementación del nuevo turbogenerador la eficiencia de planta subirá a 67.5%. El aumento de eficiencia no es mucho, debido a que también el consumo de combustible aumenta, elevando la potencia térmica suministrada, y dado que la eficiencia del generador de vapor seguirá siendo la misma; este aumenta sus pérdidas y al mismo tiempo aumenta la energía aprovechada, para generar la mayor cantidad de vapor y energía térmica útil.
- Actualmente el ingenio tiene un factor de carga en el generador de vapor de 0.88; esto es debido a que planta solo necesita 94.31 TnV/h de vapor para sus procesos y la turbina es de contrapresión. Con la nueva turbina de condensación; el generador de vapor puede trabajar con un factor de carga de 0.98 y una vez realizado su trabajo en la turbina, los excedentes de vapor pueden ser enviados a un condensador para luego volverlo al generador de vapor.
- El ingenio azucarero tiene un Heat Rate de 5.85 Tnb/Mwh debido a que para el consumo actual del bagazo solo se genera de energía eléctrica 6.95 Mw; en cambio con el nuevo turbogenerador se tendrá un Heat Rate de 2.28 Tnb/Mwh para una generación eléctrica de 20.38 Mw, considerándose más óptimo.
- El ingenio Agrolmos con el Turbogenerador de contrapresión solo abastece el 65% de vapor para sus procesos, enviando el otro 35% de vapor por un sistema de reductoras de presión; lo cual genera una pérdida de energía térmica de 4.7 Mw lo que representa económicamente a \$ 6,348 mensuales y \$ 74,820 anuales. El nuevo turbogenerador de condensación puede abastecer al 100% la demanda de vapor de procesos, generando el uso eficiente de la energía térmica y produciendo excedentes de energía eléctrica para la venta.
- Realizando un comparativo con la tesis de Gutierrz y Orue, quienes plantearon cambiar en el ingenio Cartavio las turbinas de vapor de accionamiento mecánico por motores eléctricos, realizando una inversión de \$ 11,040,00 para la compra

de un generador de vapor y un turbogenerador, logrando una potencia eléctrica máxima de 19.36 Mw con excedente de 5.16 Mw para la venta de energía, obteniendo un REE de 0.3. Para nuestro caso se obtuvo una potencia eléctrica de 20.38 Mw y excedentes de 11.38 Mw para la venta de energía, con un REE de 0.39, realizando una inversión de \$ 4,813,944 solo para el turbogenerador.

- Chunga y Cam, plantean en el Ingenio Agroindustrial Cartavio la compra de un tercer turbogenerador de 2.5 Mw; y aumento de consumo de bagazo a 69.2 Tnb/h, para generar 145.7 TnV/h de vapor para tener un incremento de la potencia efectiva de generación a 9.5 Mw, calificando para de la venta de energía con un REE de 0.378 para la inyección de 1 Mw, sin eliminar el sistema de doble estrangulación de vapor. Para nuestro estudio se plantea eliminar el sistema de estrangulación de vapor, para enviar todo el vapor al nuevo turbogenerador de 22.3 MW y generar la máxima potencia eléctrica, siendo más rentable y eficiente, generando 20.3 Mw de potencia eléctrica y consumiendo 108 TnV/h.
- En la tesis de Allison Sandoval, Realiza un balance de energía en el ingenio Cartavio con proyecciones de venta de energía eléctrica presentando escenarios, en tal ingenio aun utilizan turbinas de accionamiento mecánico en desfibradora, molinos y Turbo bombas. Obteniendo excedente de 4.38 Mw para venta utilizando aun las turbinas de accionamientos mecánicos, y con excedente de 7.85 Mw reemplazando las turbinas por motores eléctricos, Para nuestro estudio se tiene la venta de 11.38 Mw ya que utilizamos solo motores eléctricos y enviamos todo el vapor generado al turbogenerador.
- En la tesis de Robert Díaz y Denis Ordinola, realizaron un estudio en base a la instalación de un turbogenerador de 21.7 MW en la planta agroindustrial san Jacinto, teniendo como resultados 18.44 Mw de generación, Flujos de calor suministrado igual a 133.94 y 71.3 Mw térmicos útil. Mientras en nuestro estudio en un turbogenerador de 22.3 Mw tenemos como resultado 20.38 Mw de generación, un calor suministrado de 122 Mw térmicos y 62.06 Mw térmicos útil.

## 6. Conclusiones

Al finalizar el trabajo, se llega a las siguientes conclusiones cuyos valores sean:

- Realizando un balance de energía se determinó la potencia suministrada de 122 Mw; una potencia térmica aprovechada de 83.36 Mw y una potencia térmica útil de 62.1 Mw, también se halló la demanda eléctrica total del ingenio de 9 Mw. Tales demandas son cubiertas en su totalidad por el generador de vapor y el turbogenerador.
- Se evalúa el uso eficiente de la energía térmica obteniéndose pérdidas de 4.7 Mw por el sistema de reductoras de presión, lo cual equivale a \$ 74,820 anuales. Obteniendo una eficiencia de planta de 63.3 %.
- Entre los arreglos principales de cogeneración se opta por elevar el factor de carga del generador de vapor a 0.98 y eliminar el uso de las reductoras de presión de vapor, generando un ahorro y obteniendo una eficiencia de planta de 67.55%.
- La central de cogeneración se ajusta a un modelo de central de cogeneración calificada, obteniendo una relación de cogeneración de 0.33 y un rendimiento eléctrico efectivo de 0.39. Con estas condiciones la central de cogeneración está calificada para comercializar sus excedentes de energía eléctrica.
- Se ha determinado el efecto de la potencia eléctrica de 20.38 Mw los cuales cubren la demanda y obtiene un excedente de 10.38 Mw para la venta de energía.
- Se ha evaluado la rentabilidad técnica económica en el nuevo sistema de cogeneración, obteniéndose un valor anual neto de \$ 18,342,704, una tasa de interés de retorno de 85.77% y un Pay back de 1.2 años para recuperar la inversión.

## **7. Recomendaciones**

- Para futuros cálculos de balances energéticos y mejoras en un central de cogeneración que utilizan turbinas de vapor de accionamiento mecánico y/o motores eléctricos para accionamiento mecánico en el área extracción de jugos, deberían ser cambiados por un sistema difusor, ya que es más eficiente y se obtiene un ahorro de 45% aproximadamente de consumo de energía eléctrica en el área de extracción, la cual se puede vender más adelante como excedentes.
- Para futuras centrales de cogeneración se deben de eliminar los sistemas reductores de presión, para mejorar el uso de eficiencia de la energía térmica generada por la caldera, y obtener una generación máxima de energía eléctrica. Todo el flujo de vapor debe ser enviado al turbogenerador.

## 8. Referencias Bibliográficas

### TEXTOS

- Hugot E. (1986). *Manual para ingenieros azucareros*. México. Editorial Bartens
- Bermudez V. (2000). *Tecnología Energética*. España. Editorial Universidad Politécnica de Valencia
- Morán y Shapiro. (2004). *Fundamentos de la termodinámica técnica* (2da Ed). España, Editorial Reverté.
- Ministerio de energía y Minas (2006). *D.S N°037 – 2006 – EM Reglamento de cogeneracion del Peru y sus modificatorias*. MEM Peru.
- Jimenez F. (2007). *Ingeniería económica (2da Ed.)*. Costa Rica. Editorial Tecnológica
- Gonzales S.(2012). *Cogeneracion*. Peru. Ediciones UNI.
- Rein P. (2012). *Ingeniería de la caña de azúcar*. Editorial Bartens.
- Meza, R. (2014). *Eficiencia energética en Turbinas de Vapor Industriales - Siemens*. México.

### TESIS

- Gutiérrez, J. y Orue, E. (2012). *Estudio para el diseño de un sistema de cogeneración calificada para la empresa Agroindustrial Cartavio S.A.A.* (tesis de pregrado). Universidad Nacional del Santa, Perú.
- Chunga, E. y Cam, F. (2013). *Influencia del incremento de la potencia efectiva en cogeneración de energía de la empresa Cartavio S.A.A.*, (tesis de pregrado). Universidad Nacional del Santa, Perú.
- Sandoval, A. (2013). *Balance de energía del complejo Agroindustrial Cartavio S.A.A. con escenarios de generación para la venta de energía eléctrica* (tesis de pregrado). Pedro Ruiz Gallo, Perú.

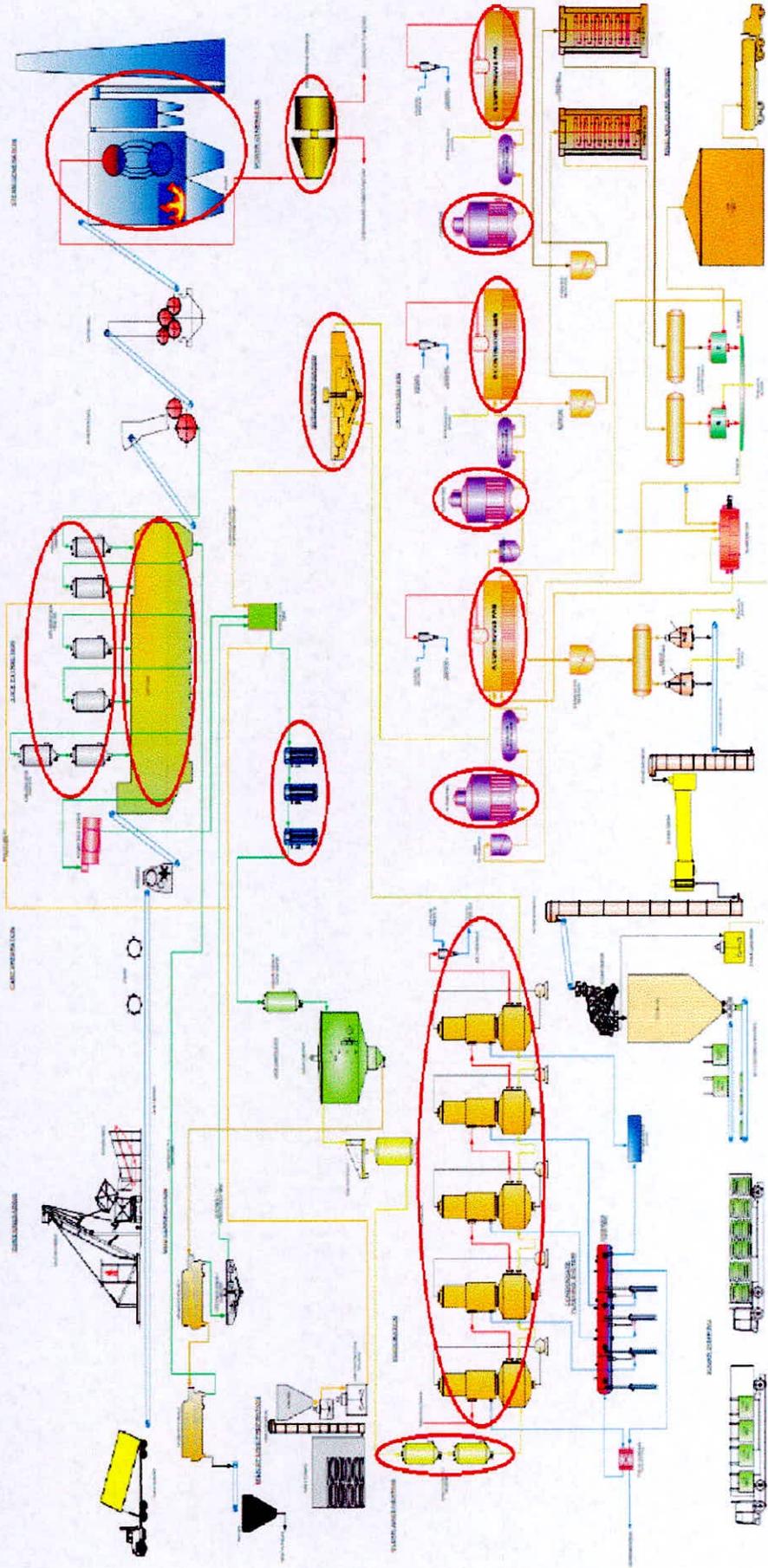
- Haro, L y Crispín G. (2015). *Ahorro de energía primaria mediante el diseño de un sistema de trigeneración en la empresa Austral Group*. (tesis pregrado). Universidad Nacional del Santa.
- Díaz, R. y Ordinola, M. (2016). *Influencia en la instalación del turbogenerador de 21.7 MW en la repotenciación de la Central de Generación de Agroindustrias San Jacinto S.A.A* (tesis de pregrado). Universidad Nacional del Santa, Perú.

#### **CITA WEB**

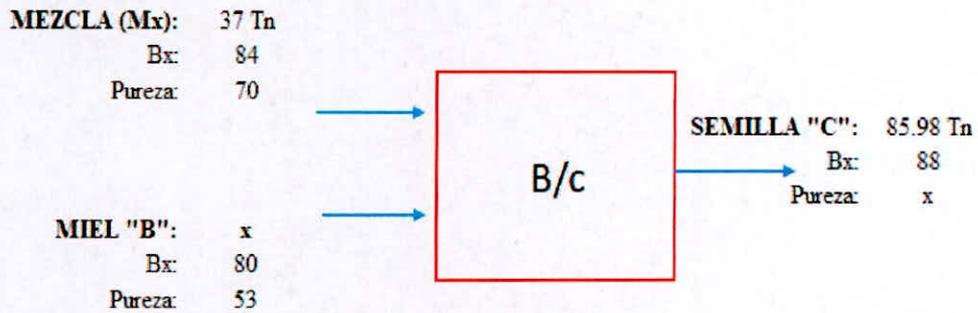
- The Sugar Enginners. <http://sugartech.co.za/index.php>.  
Consulta: 15 de agosto del 2019.

## 9. Anexos

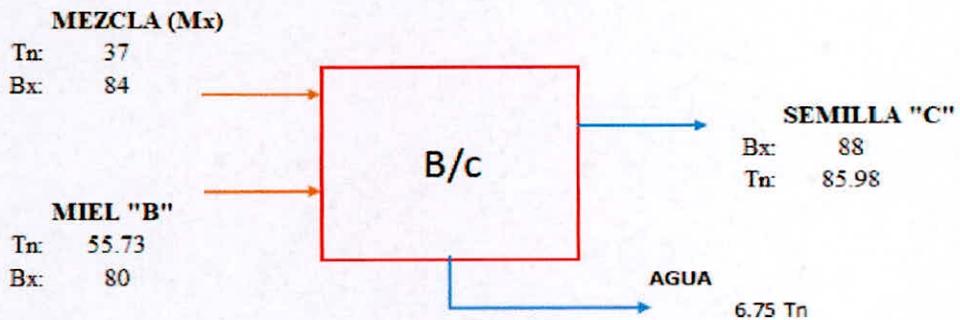
Anexo N°1: Equipos Consumidores de Vapor del Ingenio Agrólmos (Fuente: Agrólmos S.A.)



**Anexo N° 2: Balance de masa Tacho Bath B/C**

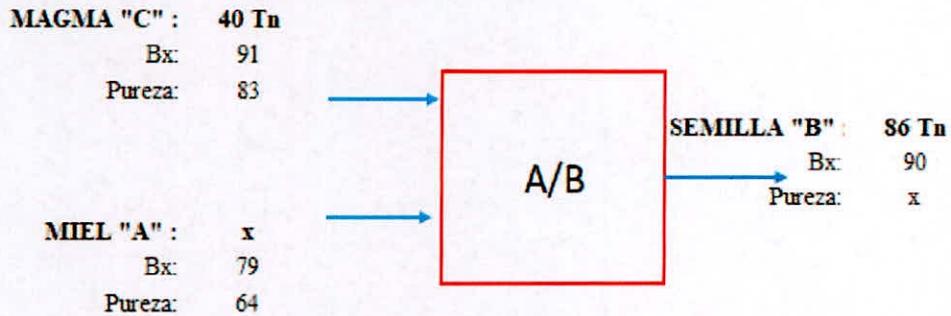


| Datos de Balances de Masas |         |      |                 |
|----------------------------|---------|------|-----------------|
|                            | Valores | U.M. |                 |
| Duracion de Cocimiento     | 3.5     | Hrs  |                 |
| Volumen de mezcla (Mx)     | 37      | Tn   |                 |
| Volumen Semilla "C"        | 85.98   | Tn   |                 |
| Parametros Obtenidos       |         |      |                 |
| Solidos semilla "C"        | 75.66   | Tn   |                 |
| Solidos Mezcla (MX)        | 31.08   | Tn   |                 |
| Pureza Semilla "C"         | 59.98   | %    |                 |
| Solido Mezcla (MX)         | 41.08   | %    | Sol Semilla "C" |
| Solido Miel "B"            | 58.92   | %    | Sol semilla "C" |
| Solido Miel "B"            | 44.58   | Tn   |                 |
| Miel "B"                   | 55.73   | Tn   |                 |



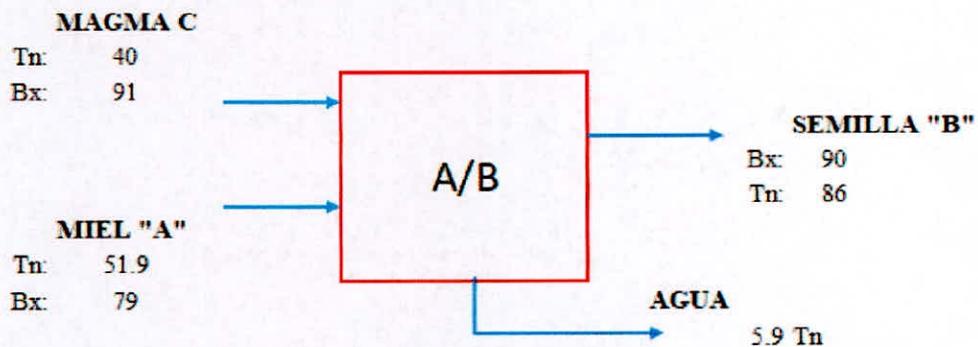
|              |       |   |
|--------------|-------|---|
| <b>F Bx:</b> | 81.60 | % |
|--------------|-------|---|

**Anexo N° 3: Balance de masa Tacho Batch A/B**



| Datos de Balances de Masas |         |      |
|----------------------------|---------|------|
|                            | Valores | U.M. |
| Duracion de Cocimiento     | 3.5     | Hrs  |
| Volumen magma C            | 40.00   | Tn   |
| Volumen Semilla B          | 86.00   | Tn   |
| Parametros Obtenidos       |         |      |
| Solidos semilla B          | 77.40   | Tn   |
| solidos Magma C            | 36.40   | Tn   |
| Pureza Semilla B           | 72.94   | %    |
| Solido Magma C             | 47.03   | %    |
| Solido Miel A              | 52.97   | %    |
| Solido Miel A              | 41.00   | Tn   |
| Miel A                     | 51.90   | Tn   |

Sol semilla "B"  
Sol Semilla "B"



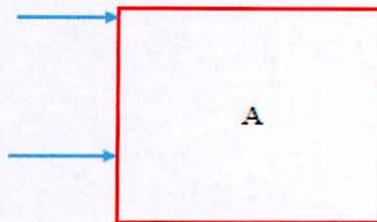
|              |       |   |
|--------------|-------|---|
| <b>F Bx:</b> | 84.22 | % |
|--------------|-------|---|

**Anexo N° 4: Balance de masa Tacho Batch A**

**MAGMA "B" : 40 Tn**

Bx: 90  
Pureza: 95

**JARABE : x**  
Bx: 65  
Pureza: 82



**SEMILLA "A" : 86 Tn**  
Bx: 87  
Pureza: x

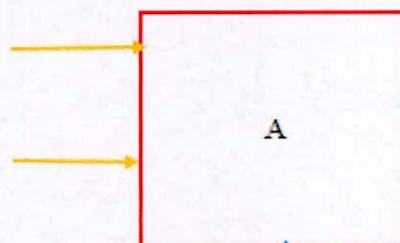
| Datos de Balances de Masas |         |      |                 |
|----------------------------|---------|------|-----------------|
|                            | Valores | U.M. |                 |
| Duracion de Cocimiento     | 3.0     | Hrs  |                 |
| Volumen de magma B         | 40.00   | Tn   |                 |
| Volumen Semilla "A"        | 86.00   | Tn   |                 |
| Parametros Obtenidos       |         |      |                 |
| Solidos semilla "A"        | 74.82   | Tn   |                 |
| Solidos Magma B            | 36.00   | Tn   |                 |
| Pureza Semilla "C"         | 88.26   | %    |                 |
| Solido Magma B             | 48.12   | %    | Sol Semilla "A" |
| Solido Jarabe              | 51.88   | %    | Sol semilla "A" |
| Solidos Jarabe             | 38.82   | Tn   |                 |
| Jarabe                     | 59.72   | Tn   |                 |

**Magma B**

Tn: 40  
Bx: 90

**Jarabe**

Tn: 59.72  
Bx: 65

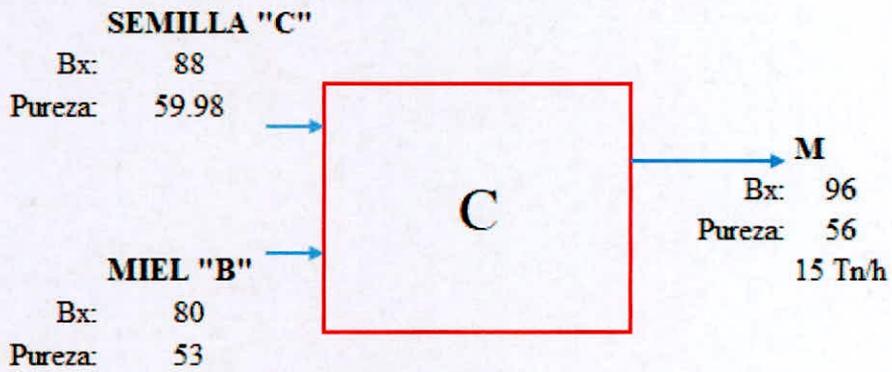


**SEMILLA "A"**  
Bx: 87  
Tn: 86.00

**AGUA**  
13.72 Tn

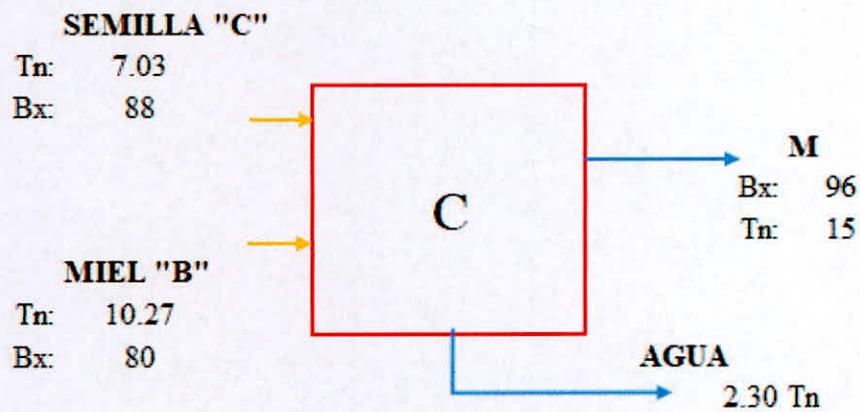
|              |       |   |
|--------------|-------|---|
| <b>F Bx:</b> | 75.03 | % |
|--------------|-------|---|

**Anexo N° 5: Balance de Masa Tacho Continuo C**



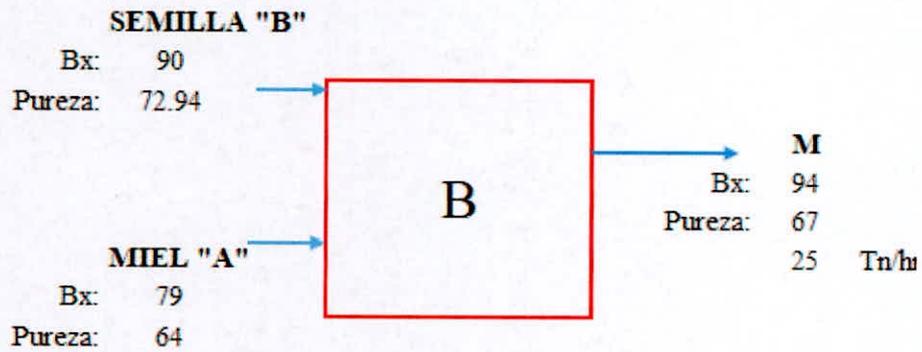
| Balances de Masas   |         |      |
|---------------------|---------|------|
|                     | Valores | U.M. |
| Solidos semilla "c" | 42.96   | %    |
| Solidos miel "B"    | 57.04   | %    |
| Solidos masa "c"    | 14.4    | Tn/h |
| Solidos semilla "c" | 6.19    | Tn/h |
| Semilla "C"         | 7.03    | Tn/h |
| Solidos miel "B"    | 8.21    | Tn/h |
| Miel "B"            | 10.27   | Tn/h |

Sol Masa "c"  
 Sol Masa "c"



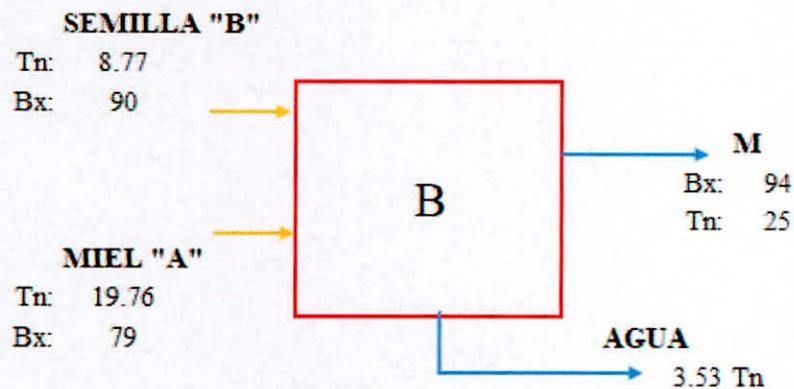
|              |       |   |
|--------------|-------|---|
| <b>F Bx:</b> | 83.25 | % |
|--------------|-------|---|

**Anexo N° 6: Balance de Masa Tacho Continuo B**



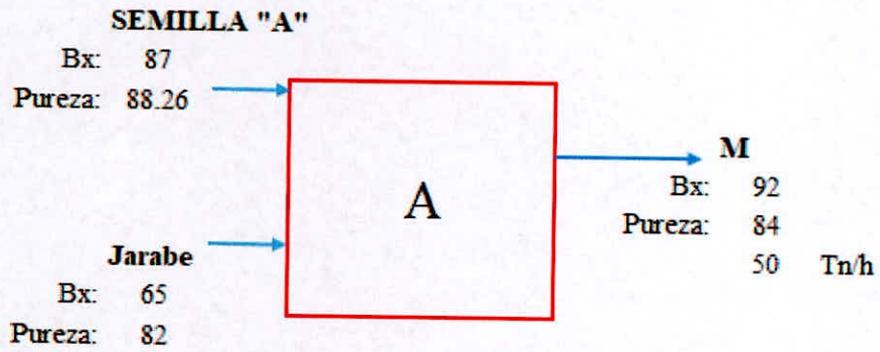
| Balance de Masas    |         |      |
|---------------------|---------|------|
|                     | Valores | U.M. |
| Solidos semilla "B" | 33.57   | %    |
| Solidos miel "A"    | 66.43   | %    |
| Solidos masa "B"    | 23.5    | Tn/h |
| Solidos semilla "B" | 7.89    | Tn/h |
| Semilla "B"         | 8.77    | Tn/h |
| Solidos miel "A"    | 15.61   | Tn/h |
| Miel "A"            | 19.76   | Tn/h |

Sol Masa "B"  
 Sol Masa "B"



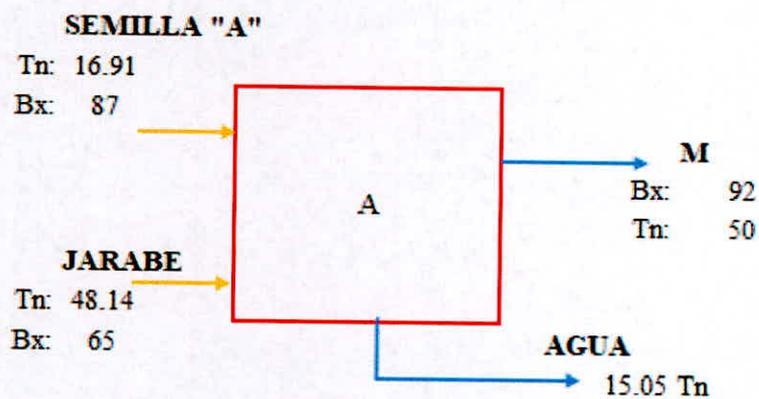
|              |       |   |
|--------------|-------|---|
| <b>F Bx:</b> | 82.38 | % |
|--------------|-------|---|

**Anexo N° 7: Balance de Masa Tacho continuo A**



| Balance de Masas    |         |      |
|---------------------|---------|------|
|                     | Valores | U.M. |
| Solidos semilla "A" | 31.97   | %    |
| Solidos Jarabe      | 68.03   | %    |
| Solidos masa "A"    | 46      | Tn/h |
| Solidos semilla "A" | 14.71   | Tn/h |
| Semilla "A"         | 16.91   | Tn/h |
| Solidos Jarabe      | 31.29   | Tn/h |
| jarabe              | 48.14   | Tn/h |

Sol Masa "A"  
Sol Masa "A"



|              |       |   |
|--------------|-------|---|
| <b>F Bx:</b> | 70.72 | % |
|--------------|-------|---|

**Anexo N° 8:** Fórmula para Calcular el poder calorífico Superior e Inferior del Bagazo

| <b>Poderes Calorificos del Bagazo - Según su Composicion</b> |  |
|--|--|
| <b>PCS</b>   | $196.05 * (100 - \%humedad - \%ceniza) - 31.14 * \% brix$          |
| <b>PCI</b>   | $18260 - (207.01 * \%humedad - 182.6 * \%ceniza) - 31.14 * \%Brix$ |

**Anexo N° 9:** Inversión Total Del Nuevo Turbogenerador de 22.3 Mw

| <b>Costo Proyecto - Inversion Inicial</b>           |                     |
|---|---------------------|
| Turbina Set   | 2500000             |
| Montaje, puesta marcha, serv. Electrico - ABC Turbo | 1350592.7           |
| Montaje, puesta marcha, serv. Enfriameinto          | 582895.5            |
| Sistemas de Fuerza y Electronica                    | 380456.2            |
| <b>costo total</b>                                  | <b>\$ 4,813,944</b> |

**Anexo N° 10:** Costo de Inversión de Mantenimiento

| <b>MANTENIMIENTO DEL TURBOGENERADOR</b> |                     |
|---|---------------------|
| WEG                                     | \$ 96,650           |
| RENZANINI                               | \$ 66,850           |
| TGM                                     | \$ 156,500          |
| <b>Costo Total</b>                      | <b>\$ 3,200,000</b> |

**Anexo N° 11:** Perdidas Económica por las Reductoras de Presión

| <b>Perdidas en las Reductoras de Presion</b> |              |         |        |          |           |
|--|--------------|---------|--------|----------|-----------|
| Mw perdidos                                  | Costo del Mw | Hora    | Dia    | Mes      | Año       |
| 4.7  | \$ 2.01      | \$ 9.45 | \$ 227 | \$ 6,348 | \$ 74,820 |

**Anexo N° 12:** Fotografías de los Generadores del Ingenio Agrolmos



**N° 1:** Vista lateral del Generador de Vapor Marca Mitre



**N° 2:** Turbogenerador de 7.5 Mw, (Turbina: TGM; Reductor: Renzanini y Generador: WEG)