

Universidad de Costa Rica

Balance energético de una extractora de aceite de palma aceitera y análisis técnico y económico para el uso más eficiente de la biomasa que se genera en el proceso de extracción

Elaborado por:

Christian Venegas López

Alejandro Salazar Vega

Carlos A. Montero Camacho

Justificación

- Antes del presente siglo las extractoras de aceite de palma se preocuparon por la extracción eficiente del aceite. Usando como combustible los subproductos biomásicos para autoabastecimiento de vapor y electricidad, sin preocuparse por la eficiencia en su utilización.
- Con el aumento de precio en los hidrocarburos se hizo necesario utilizar el recurso biomásico de una manera más eficiente. Esta eficiencia se ha venido aumentando gracias a la implementación de equipos como economizadores y precalentadores de aire en las calderas; dichas mejoras han permitido hacer a estas plantas autosuficientes de energía, y liberar además grandes cantidades de biomasa.

Objetivo general

- Optimizar el uso de la biomasa para la generación de vapor y electricidad en una extractora de aceite de palma con el fin de liberar las mayores cantidades de biomasa y realizar un análisis técnico y de costos de las mejoras al proceso planteadas.

Objetivos específicos

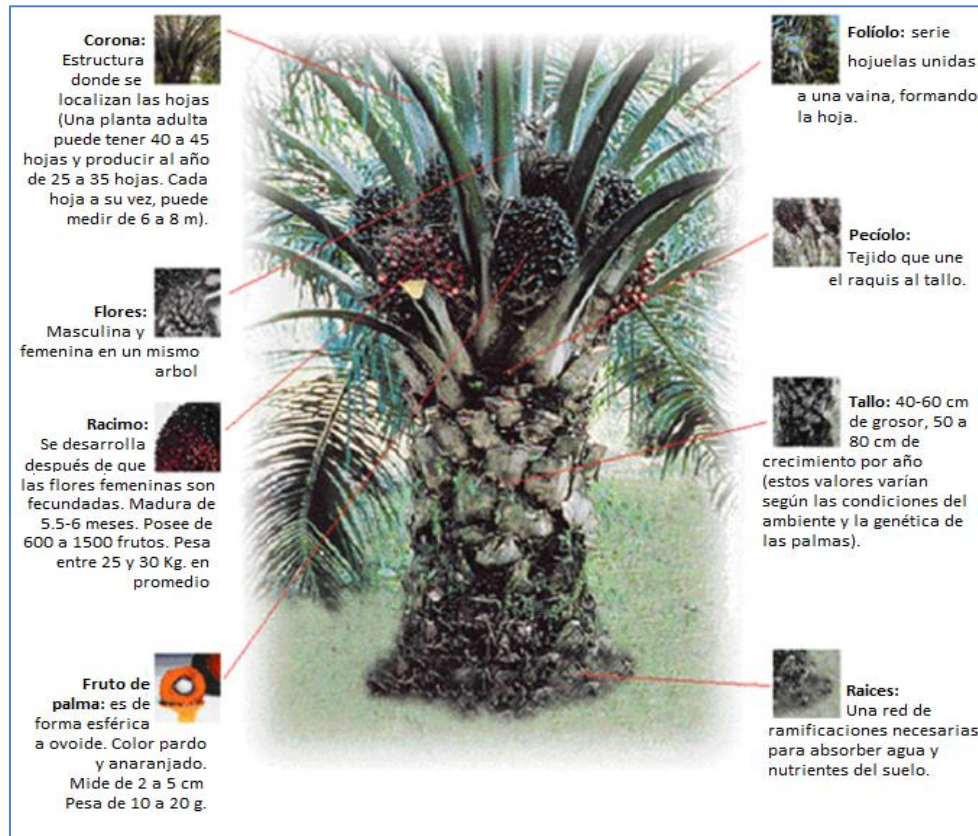
- Realizar un balance energético en una extractora de palma para optimizar el uso de la biomasa en el proceso de generación de vapor y electricidad requeridos en la extractora.
- Realizar un balance energético de fuentes y usos de la energía en la extractora.
- Determinar los volúmenes de biomasa a ser liberados
- Realizar un análisis técnico de posibles mejoras al sistema de generación de vapor para aumentar la eficiencia y liberar biomasa.
- Realizar un estimado de costos de inversión de las posibles mejoras al sistema de generación de vapor para liberar biomasa.

Generalidades Palma Tica

- Pertenece al grupo Numar, dedicada al cultivo de la palma aceitera y su procesamiento.
- Posee tres plantas extractoras de aceite, en las zonas de Palo Seco en Parrita, Naranjo en Quepos y Coto 47 en Golfito. Con capacidades de procesar 30, 32 y 90 toneladas de racimos de fruta fresca (RFF) respectivamente.
- La mayor parte del aceite producido proviene de plantaciones propiedad de la empresa, un 70%, el restante 30% proviene de particulares.
- En cuanto a la distribución geográfica de las zonas de cultivo, la mayor parte se centra en el pacífico sur.

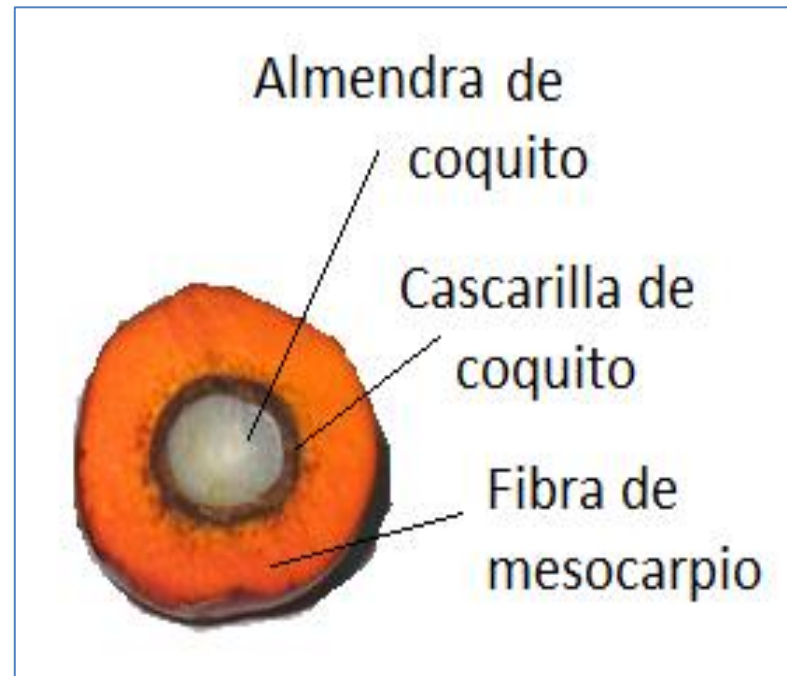
Fruto de la palma

- El aceite de palma es el principal producto que se obtiene del procesamiento de la palma aceitera en una planta extractora.

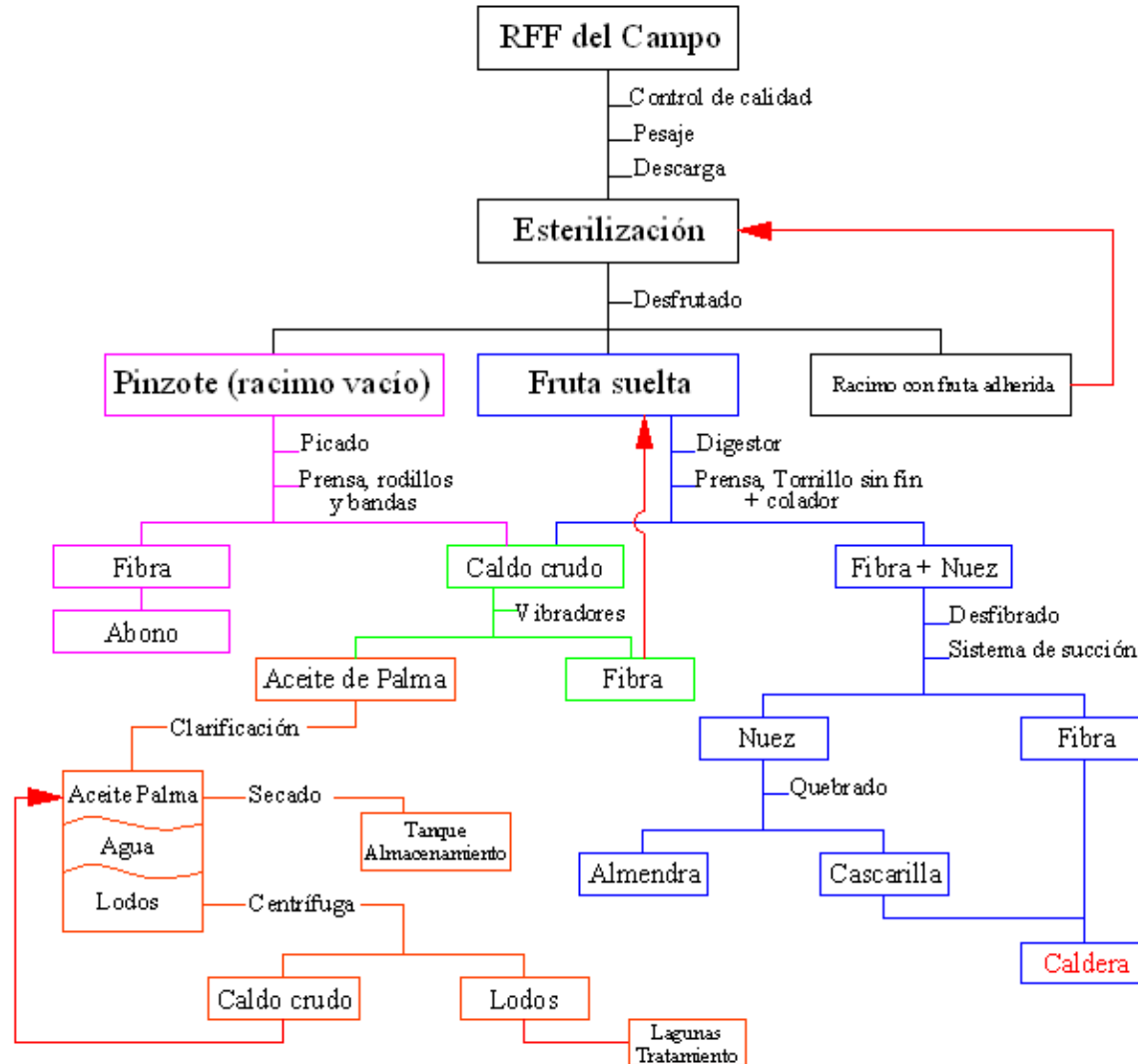


Fruto de la palma

- Partes del fruto de la palma y subproductos



Proceso extracción



Biomasa subproducto del proceso de extracción del aceite de palma

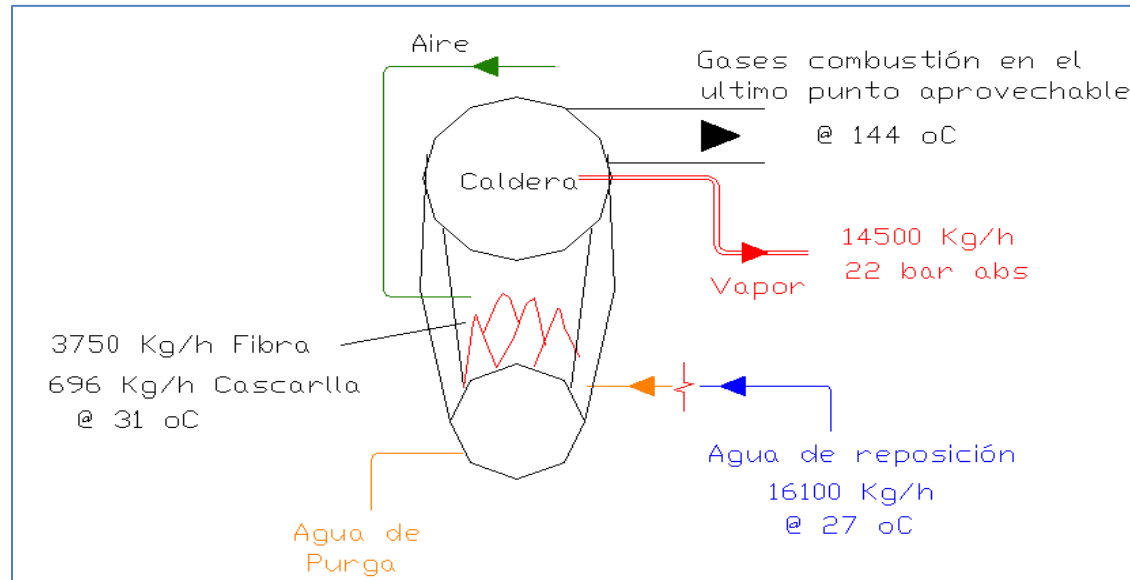
Poder calórico inferior (LHV)

- Es la energía contenida en el combustible, una vez estimado el porcentaje de humedad (w) que contiene y restado al poder calórico en base seca (HHV)
- Depende entonces de:
 - El poder calórico en base seca (HHV)
 - Porcentaje de humedad contenida (w)
 - Cambio de energía (entalpía) que sufre la humedad contenida (Δh_{H_2O})

$$LHV = HHV_{0\% \text{ humedad}} * (1 - w) - w * \Delta h_{H_2O}$$

$$LHV_{mezcla} = \%_{Cascaquilla} * LHV_{Cascaquilla} + \%_{Fibra} * LHV_{Fibra}$$

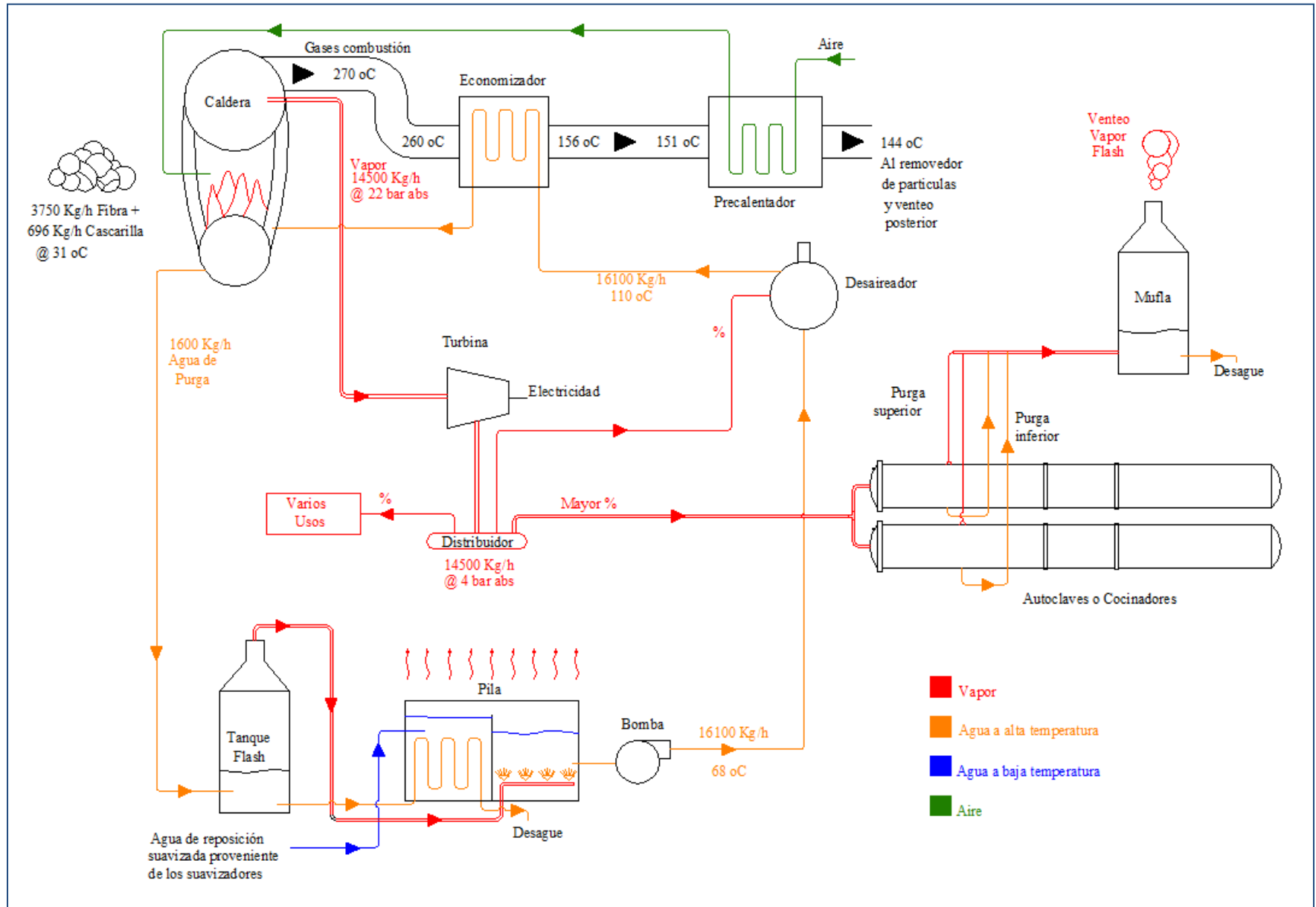
Biomasa subproducto del proceso de extracción del aceite de palma



- Condiciones de la biomasa de nuestro interés

	Humedad (%)	% del RFF	Flujo másico (kg/h)	HHV (kJ/kg)	LHV (KJ/kg)
Fibra	37	12	3750	19700	11436,0
Cascarilla	17	5,5	696	23900	19381,1
Mezcla	---	---	4446	---	12676,4

Ciclo de vapor en la planta



Eficiencia de la Caldera

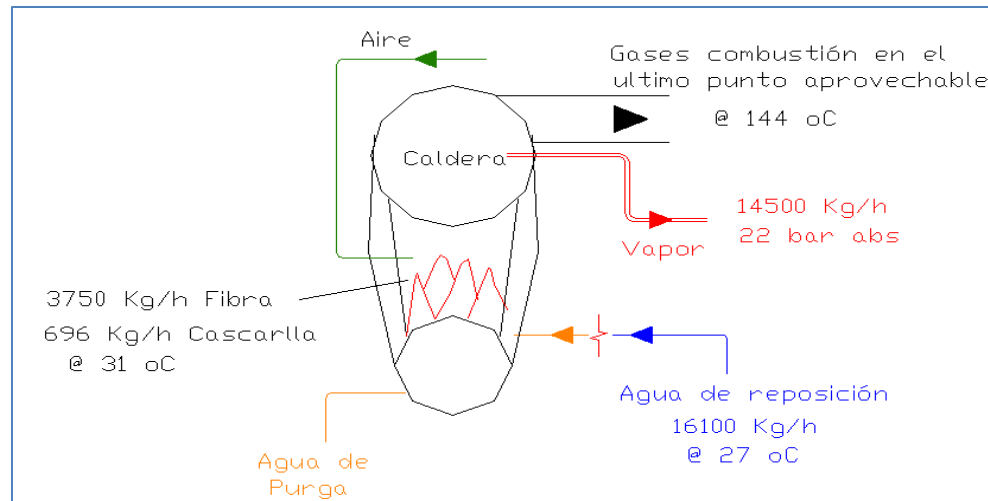
- La eficiencia se obtuvo de la energía recibida de la biomasa versus la energía entregada en forma de vapor:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Energía transmitida al vapor}}{\text{Energía entregada por el combustible}} * 100$$

- Donde:

$$\text{Energía transmitida al vapor} = \dot{m}_{\text{agua}} * (h_{\text{salida}} - h_{\text{entrada}})$$

$$\text{Energía combustible} = \dot{m}_{\text{mezcla}} * LHV_{\text{mezcla}}$$

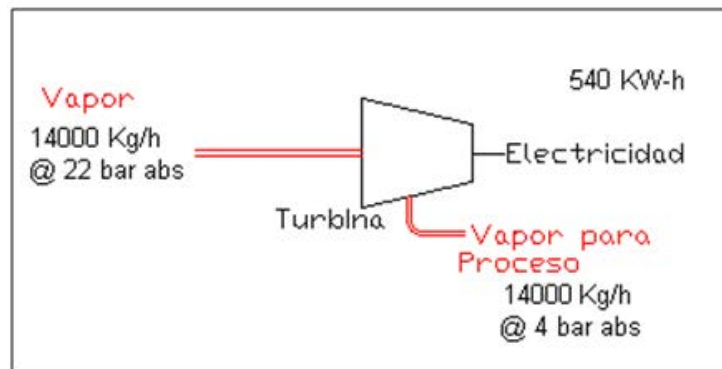


- A estas condiciones se concluyó una eficiencia de 76,7% en la caldera

Eficiencia del turbogenerador

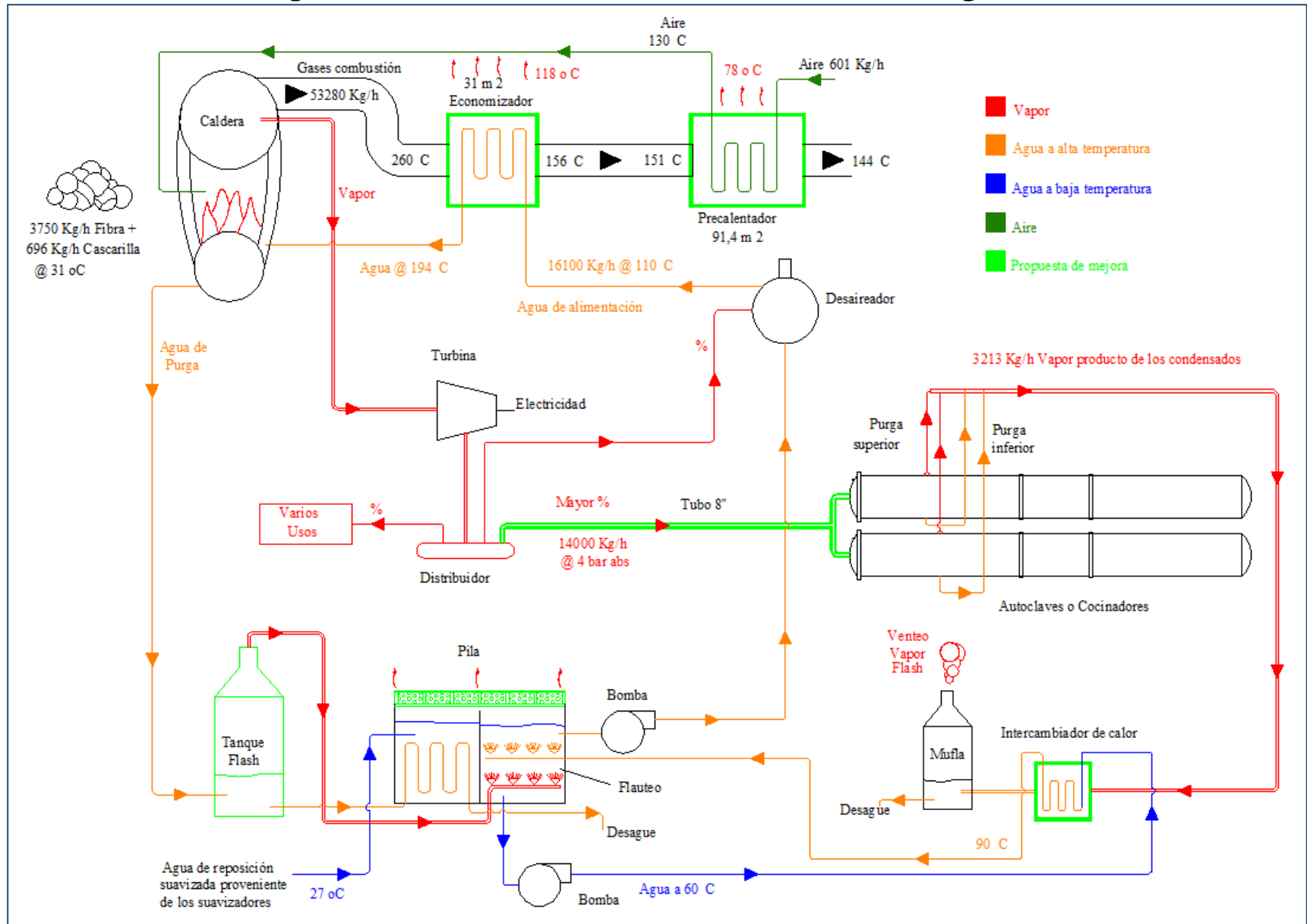
- La eficiencia se obtiene mediante el consumo específico de vapor, el cual indica la cantidad de vapor requerido para producir 1 KWh.
- Indicado por el fabricante Cesp = 18,5 Kg/KWh
- Obtenido en la extractora Cesp = 25,9 Kg/KWh

$$Eficiencia = \frac{1}{C_{esp}} * \left(\frac{3600}{\Delta h} \right)$$



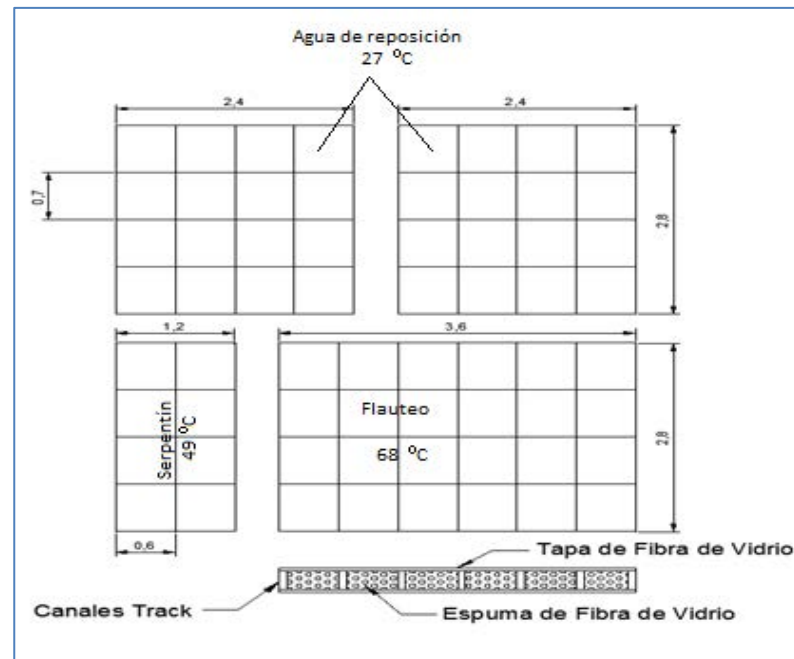
- A estas condiciones nos da una eficiencia de 44,9 %

Oportunidades de mejora



1. Techo sobre la pila de agua de alimentación de la caldera

- Consideraciones:
 - Aprovechar al máximo la energía remanente en el flujo de purga continua al evitar la pérdida de calor hacia el ambiente exterior
 - Elevar lo mayor posible la temperatura del agua de reposición a la caldera
 - Tapas desmontables y de materiales livianos



1. Techo sobre la pila de agua de alimentación de la caldera

- Pérdida por radiación
- Pérdida por convección

$$Q = Q_{rad} + Q_{conv}$$

$$Q_{rad} = \varepsilon\sigma A(T_{superficial}^4 - T_{ambiente}^4)$$

$$Q_{conv} = hA(T_{superficial} - T_{ambiente})$$

- Aplicando las ecuaciones descritas se obtiene una pérdida de **41289 KJ/h**
- Empleando las tapas de fibra de vidrio:

$$Q = \frac{(T_s - T_{amb})}{2/h * A + L/k * A}$$

- Se suma un porcentaje de 25% por radiación, y nos da una pérdida de **1100,72 KJ/h**, para un ahorro de **40189 KJ/h**.

1. Techo sobre la pila de agua de alimentación de la caldera

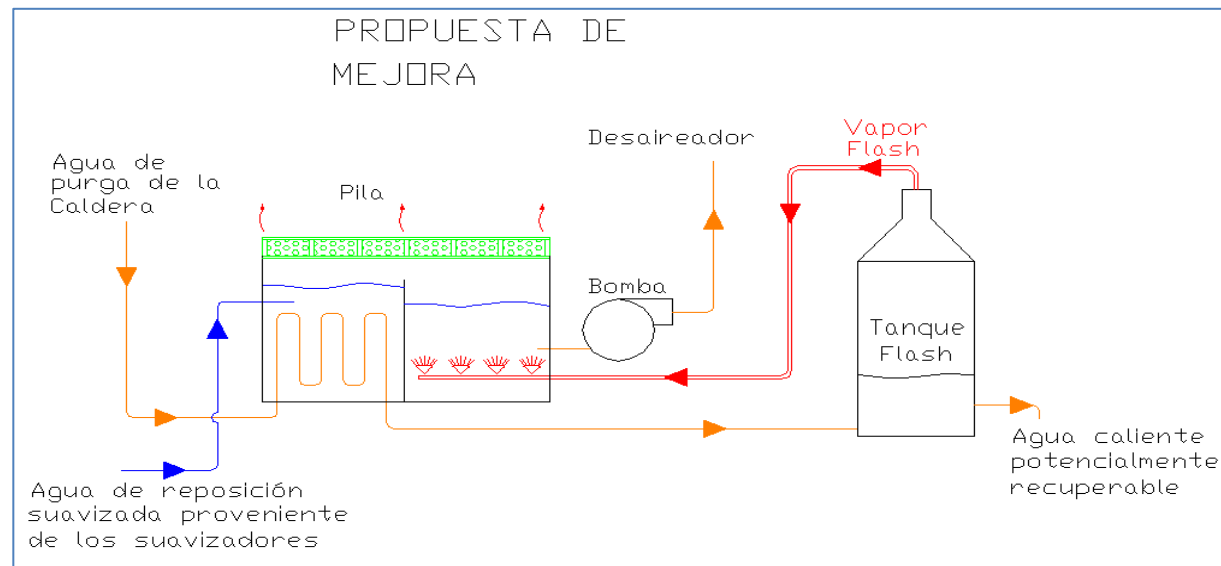
- Liberación de biomasa equivalente:

$$\dot{m}_{\text{cascarilla liberada}} = \frac{Q_{\text{ganancia}}}{LHV_{\text{cascarilla}}}$$

Valores Obtenidos	Magnitudes
Cascarilla liberada	2,02 Kg/h (12,3 Ton/año)
Pinzote equivalente	36,85 Ton/año
Ahorro anual	\$ 1400,4
Costo de la mejora (materiales + mano de obra)	\$ 1428
Tiempo de recuperación de la inversión	1 año aproximadamente
Aumento de la eficiencia del sistema	0,053%

2. Cambio en la secuencia de entrada del vapor de purga al tanque flash

- Consideraciones:
 - Hacer intercambio de calor del agua de purga con el agua de alimentación, sin pasar primero por el tanque flash, esto aumenta el área de intercambio del serpentín.
 - Elevar lo mayor posible la temperatura del agua de reposición a la caldera
 - Se disminuye la cantidad de vapor flash introducida por flauteo



2. Cambio en la secuencia de entrada del vapor de purga al tanque flash

- Sistema actual:

$$Q_{total} = Q_{flauteo} + Q_{intercambiador}$$

$$Q_{flauteo} = \dot{m}_{flash} * h_{fg@100^{\circ}C} * \eta$$

- Donde se pudo inferir que todo el vapor flash se condensaba dentro de la pila; por lo tanto se tiene una eficiencia del 100%
- La masa de vapor flash se calculó como:

$$\dot{m}_{flash} = \dot{m}_{purga} * \frac{h_{f@superior} - h_{f@inferior}}{h_{fg@inferior}}$$

- La eficiencia del intercambiador se calculó con las variables obtenidas en el sitio y empleando la ecuación:

$$Q_{intercambiador} = (\dot{m}_{purga} - \dot{m}_{flash}) * c_p * (T_e - T_s) * \eta$$

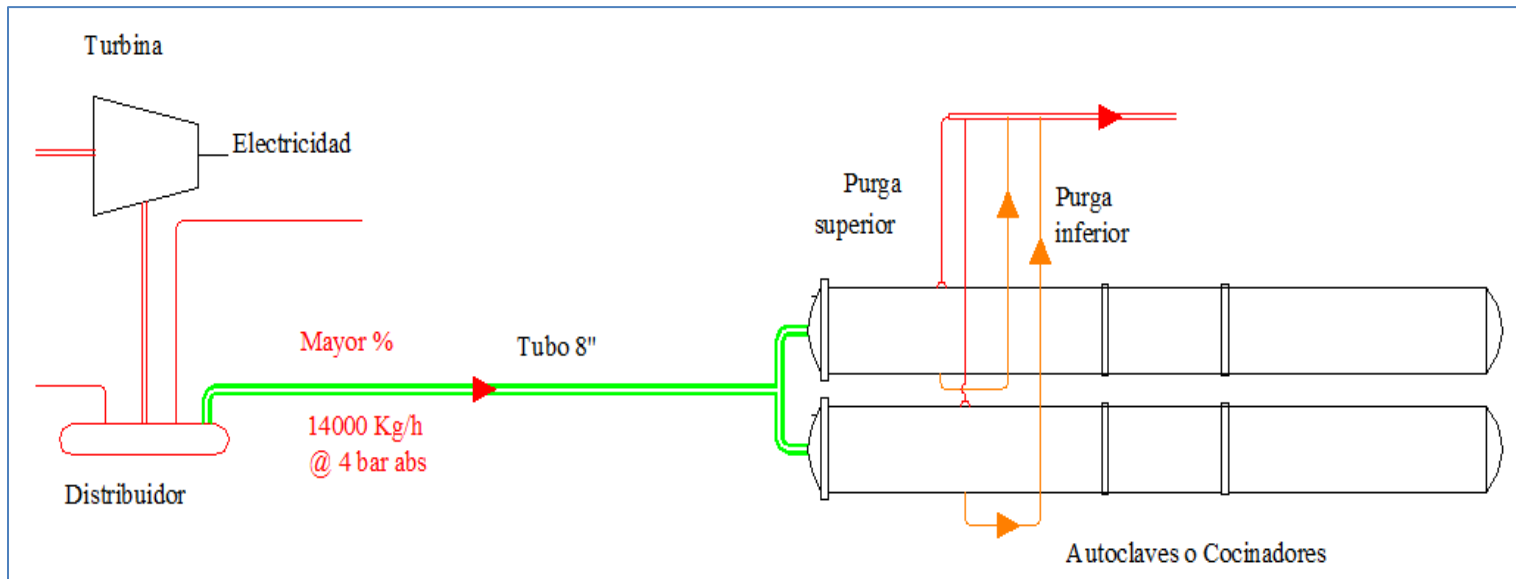
- Aplicando las ecuaciones descritas se obtuvo una ganancia de calor de **1076009 KJ/h**, donde el 70% se dio por flauteo.

2. Cambio en la secuencia de entrada del vapor de purga al tanque flash

- Consideraciones de la mejora:
 - Toda la purga entra al intercambiador, y se desprecia el pequeño % de vapor flash condensado en la línea
 - La transferencia depende de las dimensiones del intercambiador, que deben ser modificadas para maximizar la transferencia
- Tomando en cuenta lo anterior e iterando para obtener el mejor panorama en cuanto a transferencia por el intercambiador y por flauteo; se obtuvo un intercambio de **753959 KJ/h.**
- Disminuye la energía transferida en **322050 kJ/h.**
- Por lo que no es viable la propuesta

3. Aislamiento de la tubería de vapor hacia las autoclaves (cocinadores)

- Consideraciones:
 - Gran tramo de tubería en 8" pulgadas más accesorios sin aislamiento a una T superficial de 86 °C.
 - Pérdida de calor por radiación y convección hacia los alrededores



3. Aislamiento de la tubería de vapor hacia las autoclaves (cocinadores)

- Ecuaciones:

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma A (T_{superficial}^4 - T_{ambiente}^4)$$

$$Q_{conv} = hA (T_{superficial} - T_{ambiente})$$

Aplicando las ecuaciones descritas se obtiene una pérdida de **158689 KJ/h**

- Con la mejora planteada:

$$r_2 = e^{\left[\frac{2 * \Pi * K (T_1 - T_2)}{h(T_2 - T_{ext}) + \sigma \varepsilon (T_2^4 - T_{ext}^4)} + L_{nr} \right]}$$

- Aplicando la ecuación, se obtuvo un espesor de 1'' y con el mismo, una pérdida de calor de **9070 KJ/h**. Lo anterior equivale a un ahorro de **149618 kJ/h**.

3. Aislamiento de la tubería de vapor hacia las autoclaves (cocinadores)

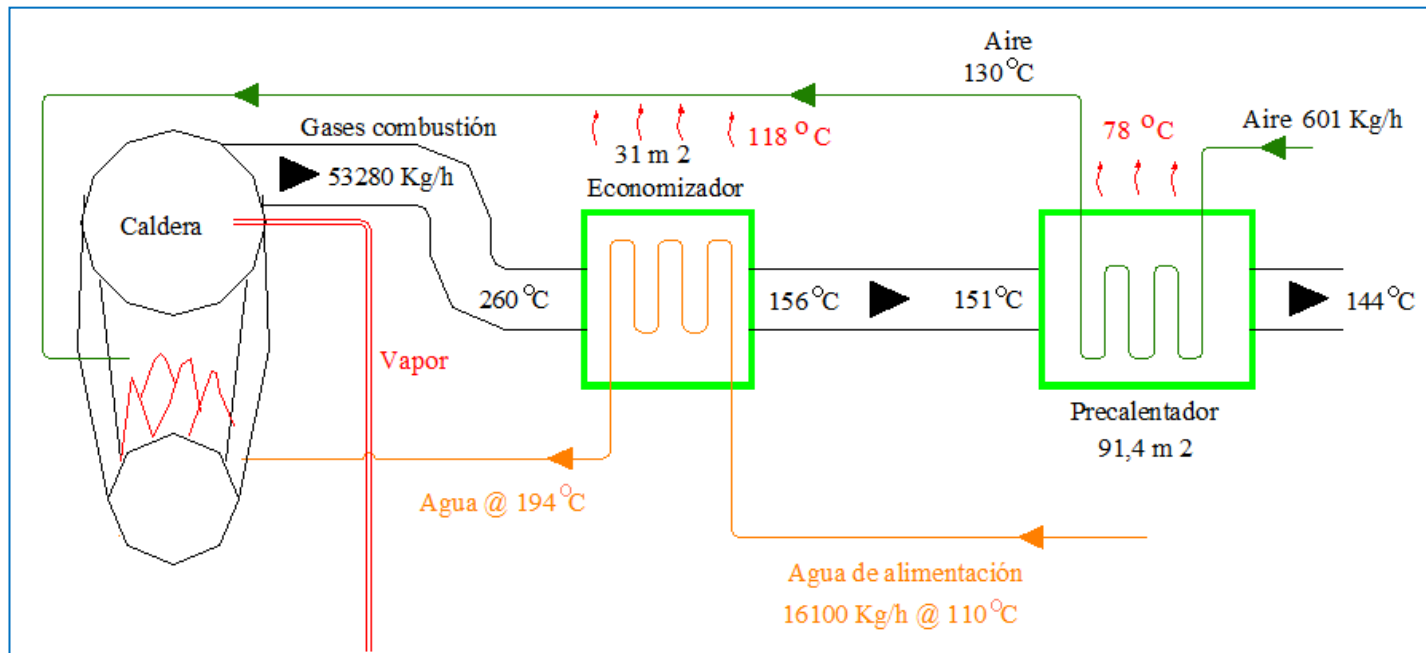
- Liberación de biomasa equivalente:

$$\dot{m}_{\text{cascarilla liberada}} = \frac{Q_{\text{ganancia}}}{LHV_{\text{cascarilla}}}$$

Valores Obtenidos	Magnitudes
Cascarilla liberada	7,73 Kg/h (47,15 Ton/año)
Pinzote equivalente	141 Ton/año
Ahorro anual	\$ 5359
Costo de la mejora (materiales + mano de obra)	\$ 2447
Tiempo de recuperación de la inversión	6 meses aproximadamente
Aumento de la eficiencia del sistema	0,2%

4. Aislamiento superficies exteriores del Precalentador y economizador

- Consideraciones:
 - Grandes áreas de transferencia de calor con el ambiente
 - Pérdida de calor por radiación y convección hacia los alrededores
 - Eficiencia del precalentador y el economizador



4. Aislamiento superficies exteriores del Precalentador y economizador

- Se aplicaron las ecuaciones de pérdida por radiación y convección y se obtuvieron, una pérdida de **326407 KJ/h** en el precalentador y de **224370 KJ/h** en el economizador.
- Se seleccionó un aislamiento de fibra de vidrio, y se calculó el espesor para aproximar la temperatura en la superficie con la temperatura ambiente (36 °C).

$$L = \frac{K * (T_2 - T_1)}{h(T_2 - T_{ext}) + \sigma \epsilon (T_2^4 - T_{ext}^4)}$$

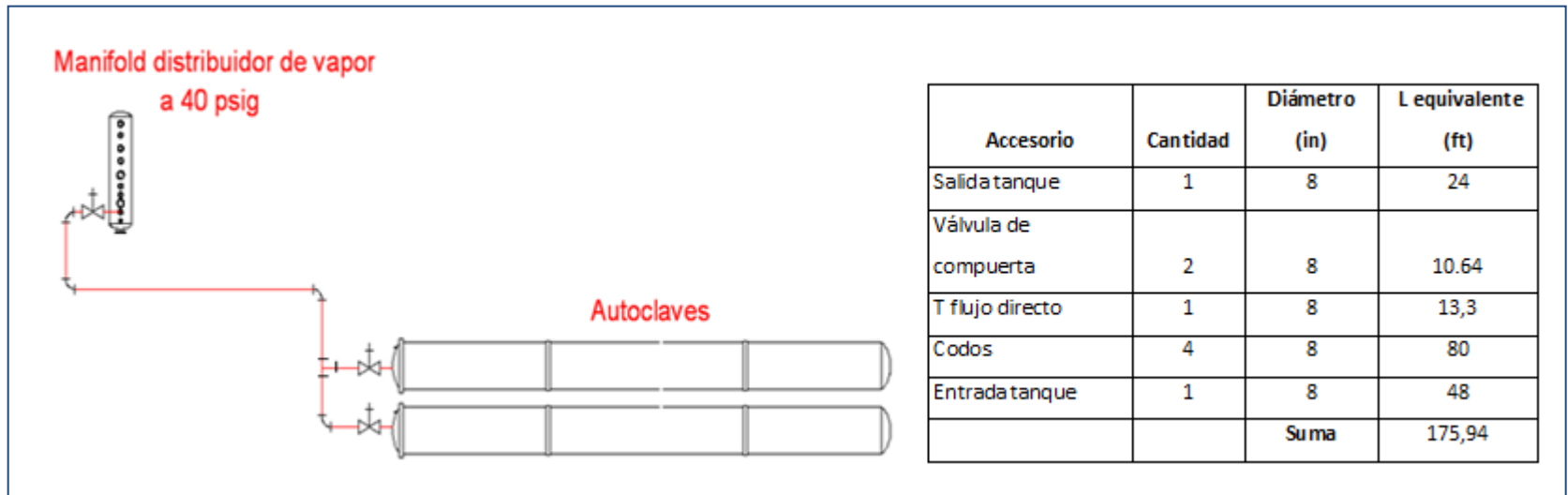
- El espesor obtenido se redondeó a un valor comercial de 2'' y 3'' para precalentador y economizador respectivamente.
- Con dichos aislamientos se ahorran **314700 kJ/h** en el precalentador y **219288 kJ/h** en el economizador.

4. Aislamiento superficies exteriores del Precalentador y economizador

- Mediante cálculos posteriores se determinó que la eficiencia del economizador debía ser de al menos un 300% para absorber toda la energía liberada.
- Por otra parte, se determinó mediante cálculos que existía un tope de energía que podía absorber el flujo de aire que se tiene hacia la caldera..
- Se descartó por lo tanto esta propuesta

5. Redimensionamiento de la tubería de vapor hacia las autoclaves

- Consideraciones:
 - Tramo de tubería considerable
 - Cantidad de accesorios significativa
 - A mayor diámetro, menor pérdida de presión y por lo tanto de energía



5. Redimensionamiento de la tubería de vapor hacia las autoclaves

- Para el diámetro actual de 8 pulgadas, un flujo de 14000 Kg/h, y los accesorios en la línea se obtuvo una pérdida de 3,4 psi
- La energía perdida es de **38207,5kJ/h**
- Para las mismas condiciones empleando una tubería y accesorios de 10 pulgadas, la caída de presión es de 1,07 psi y la energía perdida es de **13557,5kJ/h** lo cual significa una reducción de **24650kJ/h** respecto a la perdida actual.

5. Redimensionamiento de la tubería de vapor hacia las autoclaves

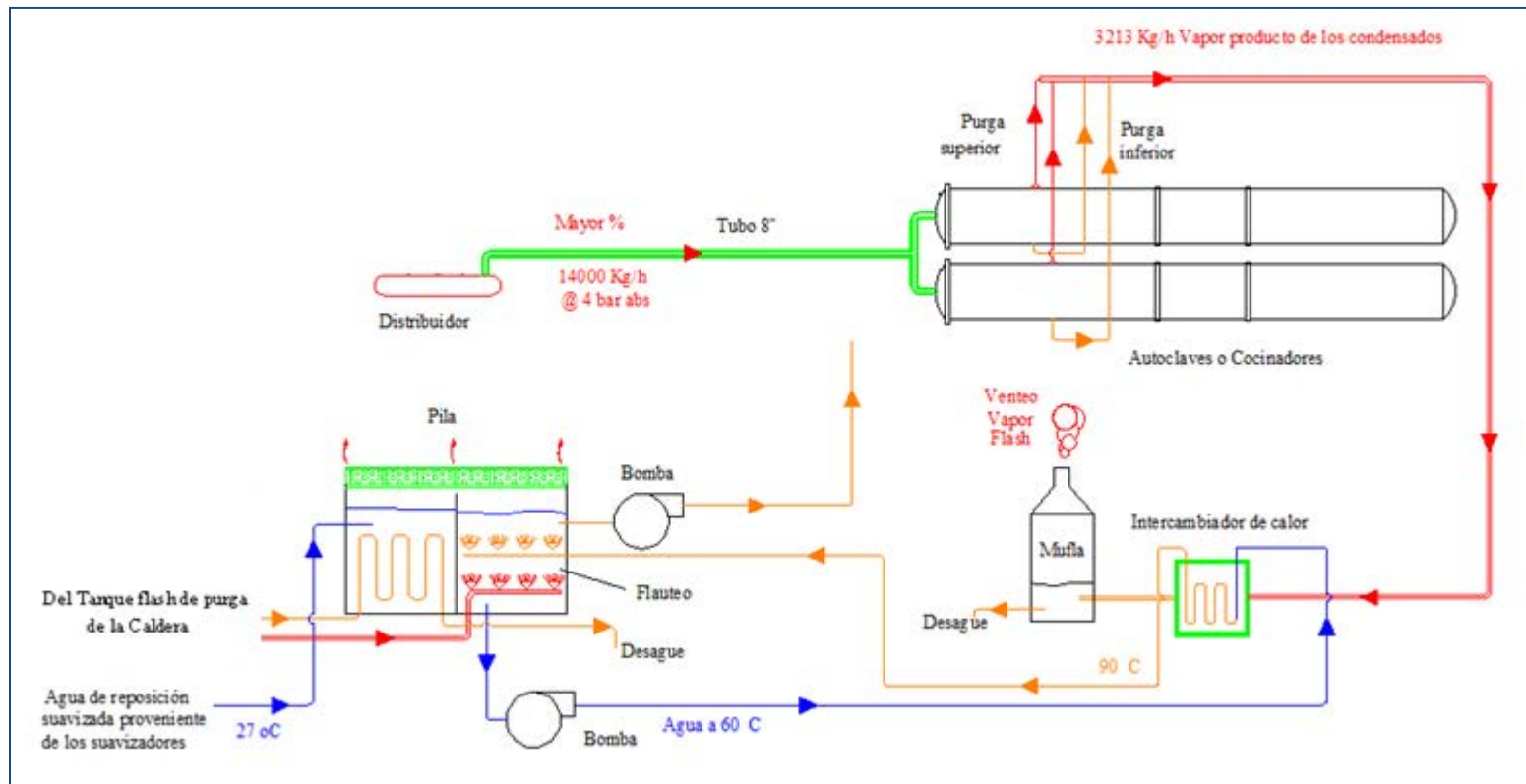
- Liberación de biomasa equivalente:

Valores Obtenidos	Magnitudes
Cascarilla liberada	1,27 Kg/h (7,7 Ton/año)
Pinzote equivalente	23,17 Ton/año
Ahorro anual	\$ 880
Costo de la mejora (materiales + mano de obra)	\$ 19457
Tiempo de recuperación de la inversión	22 años
Aumento de la eficiencia del sistema	0,03%

- El tiempo de recuperación de la inversión es demasiado alto y el aumento en la eficiencia muy bajo, por lo que se descarta esta mejora.

6. Recuperación del calor de los condensados en las autoclaves

- Consideraciones:
 - Autoclaves consumen la mayoría del vapor producido en ciclos de cocinado.
 - Toda esta energía se desperdicia a la atmósfera



6. Recuperación del calor de los condensados en las autoclaves

- El vapor de la purga superior más el vapor flash de la purga inferior se calcularon en 3213 kg/h.
- De condensar todo este vapor mediante un intercambiador de calor de alta eficiencia (85%), se puede obtener una energía aprovechable de **6167787 kJ/h**.
- Sin embargo la energía que podría aprovecharse, por el flujo del agua de alimentación a la caldera es de **2007786 kJ/h**.

6. Recuperación del calor de los condensados en las autoclaves

Valores Obtenidos	Magnitudes
Cascarilla liberada	102 Kg/h (622,2 Ton/año)
Pinzote equivalente	1861 Ton/año
Ahorro anual	\$ 70715
Costo de la mejora (materiales + mano de obra)	\$ 31075
Tiempo de recuperación de la inversión	5 meses aproximadamente
Aumento de la eficiencia del sistema	2,79 %

Conclusiones

- La implementación del precalentador de aire y el economizador permitieron aumentar la eficiencia de la caldera en aproximadamente un 13%.
- El alto consumo específico de la turbina puede deberse a que el vapor no llegue completamente saturado.
- El techo sobre la pila aumenta la eficiencia en un 0,053% lo que equivale a liberar 12,3 Ton de cascarilla al año, con una inversión recuperable en un año.
- Cambiar la secuencia de intercambio de calor con la purga continua de la caldera no es viable ya que se disminuye el vapor flash introducido directamente al agua de reposición.
- Aislar la tubería de vapor a las autoclaves aumenta la eficiencia en un 0,2% lo que equivale a liberar 47,1 Ton al año de cascarilla, con una inversión recuperable en 6 meses.
- Aislar el precalentador y el economizador, quedó demostrado que sólo aumenta la temperatura a la salida de los gases de combustión.
- Aumentar el diametro de la tubería de vapor hacia las autoclaves es factible desde el punto de vista técnico, pero se requiere una gran inversión y se obtiene un ahorro muy pequeño, de manera que se considera una opción de mejora inviable.
- La recuperación de los condensados de las autoclaves permite aumentar la eficiencia en un 2,79 % y con ello liberar 622,2 Ton al año de cascarilla, con una inversión recuperable en 5 meses.
- Con las mejoras se puede aumentar la eficiencia en un 3 %, y liberar 689 Ton al año de cascarilla cuyo valor es de \$78.357.
- La energía recuperable en los condensados de las autoclaves es de 4 160 001 kJ/h generados por el vapor flash.

Recomendaciones

- Aprovechar en su totalidad la energía contenida en los condensados de las autoclaves, buscándole usos dentro de la planta.
- Se recomienda la revisión constante de los instrumentos de medición, así como colocar más de estos en lugares estratégicos del ciclo de vapor.
- Darle un seguimiento constante a los datos arrojados por la caldera para determinar el estado real del vapor producido.
- Se recomienda la implementación del sistema de recuperación de calor de los condensados de las autoclaves, el aislamiento del techo de la pila de alimentación y el aislamiento de la tubería de vapor hacia las autoclaves.