

Increase productivity of your assets with financed projects

# THERMAL OIL RECOVERY

VIRTUAL CONFERENCE 2020



## FILOSOFÍA DE OPERACIÓN DURANTE LA INYECCIÓN DE VAPOR A POZOS PETROLEROS

A RUIZ; R FIGUERA, J RODRIGUEZ, H YERBES, L ORFILA, JW MOLINA, JD MOLINA,  
F MOLINA, J BODHANWALA, A ORTIZ  
NAKASAWA MINING AND ENERGY LTD

### RESUMEN

En la industria del petróleo, es de gran importancia la maximización de producción de hidrocarburos que se encuentra en el yacimiento. Los factores de recuperación de petróleo dependen no solamente de las propiedades de las rocas y condiciones del fluido, sino también de la tecnología con la que se cuenta para poder extraer el mayor porcentaje de crudo. Una de las técnicas más comunes es la Recuperación Mejorada de Hidrocarburos con inyección de vapor, que añade energía a un yacimiento para estimular la producción, incrementar el factor de recobro y extender la vida útil del yacimiento.

El objetivo principal es detallar los principios o secuencias que se rigen a través de una Filosofía de Operación y control en las operaciones de Generación e Inyección de Vapor en la recuperación mejorada de hidrocarburos teniendo en cuenta que, desarrollando una filosofía operacional, describirá con éxito la efectividad y eficiencia de la Inyección de vapor en pozos petrolíferos. En cuanto a la metodología, se basó en el análisis de los datos obtenidos en los sistemas de control del generador de Vapor NK 30 TTS y las operaciones a pozos inyectoros de vapor, a su vez se integrarán las variables más importantes que se deben tener en cuenta durante la inyección de vapor

### INTRODUCCIÓN

El Generador de Vapor es una caldera de alta presión para la inyección de vapor, destinado a transformar agua en vapor, a temperatura y presión diferente a la atmosférica en un solo paso, diseñado para la inyección de vapor y la recuperación de crudos pesados y extra pesados con gravedad < 15 °API.

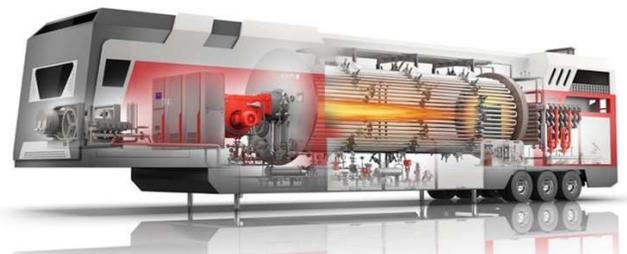


Fig 1. Generador de Vapor NK 30 TTS 25 MMBTU/hr

El Vapor a alta presión y temperatura genera vapor saturado o sobre calentado suministrando energía térmica (BTU) en forma de vapor para inyectarlo a un yacimiento y así estimular el hidrocarburo, mejorando su viscosidad y fluidez, para facilitar la movilidad del crudo en su extracción. Este tipo de Generador de Vapor acuatubular de circulación forzada emplea un serpentín para agua como elemento de

transferencia de calor y un sistema de combustión y escape.

La función del generador de vapor (NK30-TTS) es producir vapor a alta presión para compensar la caída de presión de fondo del yacimiento en el pozo a inyectar.

La Filosofía operacional en la Generación e Inyección de Vapor es de suma importancia ya que a través de esta, se controla el funcionamiento del generador de vapor y la Inyección de Vapor donde se controlan las variables operacionales de acuerdo a esquemas de trabajo preestablecidos y así minimizar o reducir a cero las fallas o tiempos improductivos en el proceso.

## 1. DESCRIPCIÓN GENERAL GENERADOR DE VAPOR

El Generador de Vapor es una unidad horizontal con una bobina de serpentina de paso único. Este tipo de diseño horizontal es utilizado para facilidad de instalación y reparación en campo.

Los componentes y accesorios del generador de vapor están montados sobre una estructura robusta de acero Integrada a un tráiler dividido en tres zonas.



Fig 2. Partes del Generador de Vapor NK 30 TTS

### Sección de potencia y control:

- Panel tipo CCM, suministro eléctrico y de automatización y control.
- Sistema de control basado en un controlador lógico programable (PLC).
- Sistema de control de llamas.
- Bomba Quíntuplex.

- Compresor de aire.
- Quemador de gas combustible Dual.
- Amortiguadores de pulsación en la succión y descarga de bomba quíntuplex.

### Sección Radiante:

#### Internamente

- Has de tuberías tipo serpentín

#### Externamente

- Pre calentador del agua de alimentación.
- Tren de gas combustible.
- Tren de combustible diésel.
- Sistema de hidráulica del tráiler.
- Interconexión agua/vapor
- Controles e instrumentación

### Sección de Convección

- Válvulas de seguridad.
- Válvula de descarga de vapor.
- Válvula de venteo de vapor.
- Analizadores de gases de combustión y calidad de vapor.
- Indicadores de temperatura y presión.
- Transmisores de flujo, temperatura y presión.
- Válvula control de presión vapor.

## 2. FILOSOFÍA DE ENCENDIDO DEL GENERADOR DE VAPOR

El Generador de vapor, posee una filosofía de control automática a través de un PLC, con quemador de combustible dual Gas / Diésel, venteo tanto en piloto como en el quemador, detección de llama, encendido eléctrico y piloto continuo el cual ejecuta la secuencia de arranque, seguridad y control.

La característica del vapor a la salida del Generador de Vapor es controlada por los lazos de control de presión en conjunto con el control de combustible, lazo de control de flujo y el analizador de calidad de vapor.

Para iniciar la secuencia de arranque en el Generador de vapor, se debe cumplir lo siguiente:

## Verificación de Permisivos.

- Pulsador de parada de emergencia del generador, no debe estar activo.
- Pulsador de parada de emergencia en sala de control no debe estar activo. **(SI APLICA)**.
- Válvula de venteo Gas piloto abierta.
- Válvula de venteo Gas quemador abierta.
- Válvula de bloqueo Gas piloto cerrada.
- Válvula de bloqueo Gas quemador cerrada.
- No debe existir Alta temperatura de vapor.
- No debe existir Alta temperatura zona radiante.
- No debe existir Bajo flujo de agua.
- No debe existir baja presión de gas combustible.
- No debe existir alta presión de gas combustible.
- No debe existir baja presión aire en ducto del ventilador del quemador.
- No debe existir Baja presión de aire del instrumento.
- El controlador de llama no debe estar en falla.
- Luces de permisivos encendidas.
- Mover el selector de encendido del programador de llama a "ON", este verifica la posición de bajo fuego de la válvula de control.

Una vez verificados los permisivos de ignición, el programador de llama ejecuta la siguiente acción.

## Pre-purga de gases en el hogar del generador de vapor.

Colocar en posición "ON" alto fuego, en panel de control, para la activación del soplador de aire del quemador, para purgar los gases inflamables en el hogar del generador de vapor.

Transcurrido el tiempo de pre-purga, el controlador de llama posiciona el dámper del quemador a bajo fuego y se enciende en el Panel de Control Local la indicación de Gas Piloto "ON".

## Encendido de piloto.

Finalizada la purga, el controlador de llama inicia el proceso de generación de chispa, se cierra la válvula de venteo de piloto, se abre la válvula de bloqueo del piloto, se verifica la presencia de llamas, a través del el detector de llama, se enciende el piloto, en el tablero se encenderá la luz indicadora de piloto encendido y la secuencia continua.

En caso de no detectarse la presencia de llama en un tiempo determinado el proceso de ignición es abortado, se abre de manera automática la válvula de venteo y se cierra las válvulas de bloqueo. Se investiga la causa de la falla y se corrige, luego se espera un minuto antes de volver a intentar el encendido del piloto.

## Encendido de Quemador.

Una vez que el sensor de llama detecte llama estable, el indicador "GAS Piloto ON" se ilumina fijo, el Controlador de Llamas procede a cerrar automáticamente la válvula de venteo de la línea a quemador y a energizar las dos válvulas de bloqueo Maxon de la línea a quemador.

El gas pasará al quemador a través de la válvula auto reguladora de presión y el generador se encenderá en condiciones de llama mínimo (30-40%). Una vez encendido el generador, el operador deberá verificar visualmente la calidad de la llama y ajustará la misma si es necesario (entonación).

El ajuste de las condiciones de operación a la salida del Generador de Vapor se realiza desde el sistema de control Allen, para despachar una cantidad definida de vapor con la presión y calidad requerida.

De ocurrir un paro en el generador de vapor, se debe verificar que la condición causante del Paro regrese a la normalidad, el generador podrá ser reactivado por el operador, retomando el paso de encendido de quemadores en el Panel de Control.

### 3. FILOSOFÍA DE INYECCIÓN DE VAPOR

Al iniciar un ciclo de Generación e Inyección de vapor en un pozo petrolífero, se debe seguir una secuencia de actividades para un evitar contrapresiones o fallas en el sistema al momento de alinear el vapor con el yacimiento.

Para lograr el equilibrio en el sistema es fundamental tomar en consideración las siguientes premisas:

- Abrir la válvula maestra y del cabezal del pozo, para evitar contrapresiones en el proceso de estabilización de la inyección de vapor.
- En el momento que se establecen los Parámetros de operación  $\pm 300$  psi /  $300$  °F en salida del Generador de vapor se inicia la alineación del vapor al yacimiento.
- Abrir paulatinamente la válvula en la línea de inyección hacia el pozo y cerrar lentamente la válvula de venteo o alivio del generador para ir estabilizando el proceso.
- Abrir la válvula lateral del pozo “revestidor de producción” y debe estar cerrada la válvula de alivio o venteo para evitar el incremento gradual de temperatura – presión y la fuga del aislante térmico (SI APLICA).
- Observar en los dispositivos o indicadores locales de temperatura y presión el incremento o comportamiento de los parámetros de operación en el Generador de Vapor, Cabezal de pozo y revestidor.
- Esperar hasta lograr el equilibrio térmico en el sistema y la expansión térmica.
- Luego del precalentamiento del pozo se debe establecer los valores de operación de acuerdo al programa de inyección establecido.
- Lograr calidad de vapor mínima de 80% y ajustar parámetros
- Inicio de Inyección  $P_i = P_b + 100$  psi
- Max. Rata Flujo de agua ( $Q_m$ )  $\geq 52$  gpm

### 4. EVALUACION DE PARAMETROS DE OPERACION.

Durante el proceso de generación e Inyección de vapor es de suma importancia cumplir con el

monitoreo constante de las variables operacionales que puedan limitar u ocasionar daños en el buen funcionamiento del generador de vapor y la inyección de vapor al pozo.

Es fundamental que durante el proceso de generación e inyección de vapor tomar en consideración las siguientes premisas:

- Registrar en el libro y la hoja de reporte diario, los parámetros operacionales durante el ciclo de inyección de vapor.
- Registrar todas las novedades que ocurren durante el ciclo de inyección.
- Mantener extrema vigilancia del comportamiento de la válvula del anular, para evitar contrapresiones, represionamientos o escapes.
- La presión en el espacio anular no debe exceder de 1200 lpc durante el periodo de inyección.
- Durante el periodo de inyección, la temperatura en el anular no debe exceder de  $300$ °F.
- Si se alcanza un valor de elongación superior a las 7”, se debe notificar inmediatamente.
- Continuar inyección de vapor hasta alcanzar las toneladas programadas.
- Mantener el flujo y la presión de inyección.
- Cumplir con los días de inyección programados.
- Finalizar ciclo de inyección.
- Analizar el comportamiento de Presión y Temperatura en el generador de vapor, cabezal del pozo y revestidor de producción

### Límites o parámetros operacionales

DESCRIPCIÓN	VALOR LÍMITE
Flujo agua (GPM)	$< 52$ GPM
Succión Generador de vapor	30 PSI
PSI descarga de vapor	$< 1800$ PSI
Temp. descarga de vapor	$< 630$ °F
Temp. zona radiante	$< 750$ °F
Temp. chimenea	$< 700$ °F
Compresor de aire	80 – 100 PSI
Calidad vapor	$\pm 95\%$ .
pH entrada	7.0
pH salida	12.0
O <sub>2</sub> entrada al Generador	0.10 mg/kg.
Dureza del agua	$\leq 0,1$ mg/l

DESCRIPCIÓN	VALOR LÍMITE
Gas combustible	0.7 MM SCFD
Eficiencia térmica Neta	90%
Máximo calor liberado	25 MMBTU/Hr.
Presión Cabezal del Pozo	< 1800 PSI
Temp. Cabezal del pozo	< 600
Presión Rev. Producción	≤ 1.200 Psi
Temp. Rev. Producción	< 300 °F
Elongación	< 7"
Concentración de O <sub>2</sub>	18 – 21 %
Concentración H <sub>2</sub> S	< 5 ppm

## 5. IMPORTANCIA DE MONITOREO DE LAS VARIABLES DURANTE EL PROCESO DE INYECCIÓN DE VAPOR

Para obtener resultados confiables en el proceso de Generación e Inyección de Vapor en pozos petrolíferos, es de suma importancia llevar una data confiable del proceso que permite emitir informes y reportes confiables.

En el proceso de Generación e Inyección de vapor el seguimiento continuo de los parámetros es realizado a través de un Reporte de operaciones donde se toma lectura de los mismos en los indicadores locales, transmisores y panel view ubicados en el Generador de Vapor, planta de tratamiento y cabezal del pozo, además de realizar análisis físico químico del agua para comprobar dureza del agua, O<sub>2</sub> disuelto y calidad de vapor.

Un parámetro operacional fuera del límite puede acortar la vida útil del generador, planta de tratamiento o el pozo inyector. Por lo que conllevaría a una baja tasa de producción en el yacimiento, una falla estructural en el pozo o daños en tuberías del generador de vapor.

Se describen Parámetros operacionales que deben ser monitoreados o analizados constantemente para evitar la mala operación o fallas en los sistemas:

### Dureza del Agua o CaCO<sub>3</sub>

Altas concentraciones de sales de calcio y magnesio en el agua de alimentación al generador de vapor favorece la formación de depósitos e incrustaciones sobre la superficie de

la tubería lo cual produce pérdidas en la eficiencia de la transferencia de calor. Debido a esta causa la dureza en el agua de alimentación al generador de vapor debe ser cero (0 ppm).

### O<sub>2</sub> entrada al Generador

Elevadas concentraciones de oxígeno en agua de alimentación al generador de vapor produce picaduras en las tuberías atacando al cobre y las aleaciones de cobre. La corrosión reduce la de transferencia de calor, la eficiencia y confiabilidad del Generador de vapor.

El oxígeno presente en el agua favorece la corrosión de los componentes metálicos de un Generador de Vapor. La presión y temperatura aumentan la velocidad con que se produce la corrosión.

Es por ello que se debe inyectar adecuadamente un producto secuestrante de oxígeno y su concentración debe ser menor a 0.10 mg/kg.

### Determinación del pH

Con el fin de evitar la corrosión de las partes metálicas del generador de vapor debido a la presencia de oxígeno, se recurre a la medición del grado de alcalinidad o acidez (pH). El pH representa la característica ácida o alcalina en el agua, por lo que su control es esencial para prevenir problemas de corrosión (bajo pH) y depósitos (alto pH).

Escala de valores pH (concentración de iones de hidrógeno):

- pH entre 0 y 6 indica agua ácida.
- pH igual a 7 indica agua neutra.
- pH igual 8 y 12 indica agua alcalina.

Se recomienda que el pH del agua en el generador de vapor este en el rango de 7.0 - 12.0

El tratamiento del agua de alimentación para un Generador de vapor es fundamental para asegurar su vida útil, y evitar problemas de corrosión e incrustaciones.

El aseguramiento de la calidad del agua de alimentación del generador de vapor se consigue

cumpliendo con los requerimientos de las normas, que definen los límites recomendados para los parámetros involucrados en el tratamiento del agua.

### Calidad de Vapor

Viene dado por el porcentaje en la masa de vapor seco (80%) y húmedo (20%) en una mezcla líquido-vapor.

El 80% vapor seco, 20% vapor húmedo que arrastra los sólidos disueltos, reduciendo así la posibilidad de vaporización, previniendo o evitando la precipitación, deposición o formación de escamas y la subsecuente falla en las tuberías de los generadores de vapor. Existen tecnologías como el Super Matroid Heater de Nakasawa que puede manejar 95 a 98% de calidad sin afectar el funcionamiento del generador de vapor debido a que cuenta con un separador ciclónico en el sistema de generación de vapor.

### Concentración H2S

La concentración de H2S en los combustibles pueden acelerar los procesos de corrosión del sistema y en concentraciones mayores a 5 PPM, es nocivo para la salud; este es un Gas incoloro, tóxico, inflamable, corrosivo, contaminante y más denso que el aire. Si no se monitorea correctamente puede producir Irritación leve de los ojos y del tracto respiratorio inconsciencia, posible edema pulmonar, muerte y daños irreversibles de los equipos, por eso su valor máximo permisible de trabajo son 5 ppm, se recomienda trabajar bajo un ambiente de 0 ppm.

### Revestidor de Producción

Sección de un pozo por la cual se desplazan los fluidos de producción y fluidos inyectados, en el diseño para la inyección de vapor el tubing de inyección va por dentro de su sección, por lo cual es indispensable aislar el tubing del casing, para esto se puede utilizar la tubería VIT o en su defecto aislante con N2. Al producirse altas temperaturas, el casing y la cementación pueden sufrir daños irreparables si no se aísla correctamente, estos pueden sufrir alta

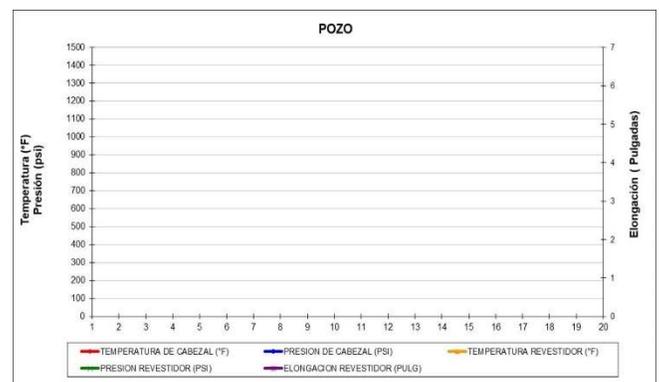
elongación o pardeamientos y la empaadura térmica puede fallar.

### Elongación

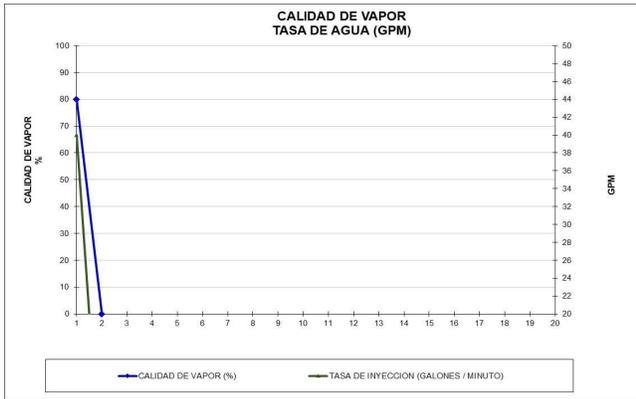
La elongación es un parámetro importante por monitorear, ya que durante el proceso de inyección cíclica de vapor, la estructura mecánica del pozo se expande debido al efecto de dilatación recibido por el calor transmitido del vapor saturado. El alargamiento se representa como un aumento de longitud donde la alta deformación significa que el material es dúctil y es causada por el estrés térmico del pozo relacionado con la fatiga del material. Para evitar deformaciones y posibles daños estructurales en el tubing es recomendable una elongación  $\leq 7$ ".

En los sistemas con tubería aislada, la elongación Revestidor esta en el rango de "0 a 1" debido a su excelente aislamiento.

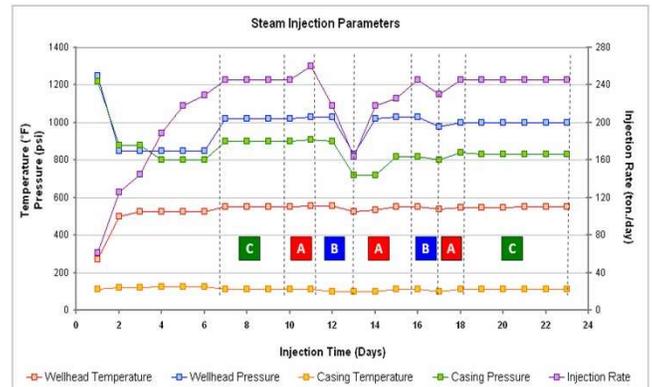
## 6. GRAFICAS DE SEGUIMIENTO A PARAMETROS OPERACIONALES EN EL COMPORTAMIENTO DE LA GENERACIÓN E INYECCIÓN DE VAPOR.



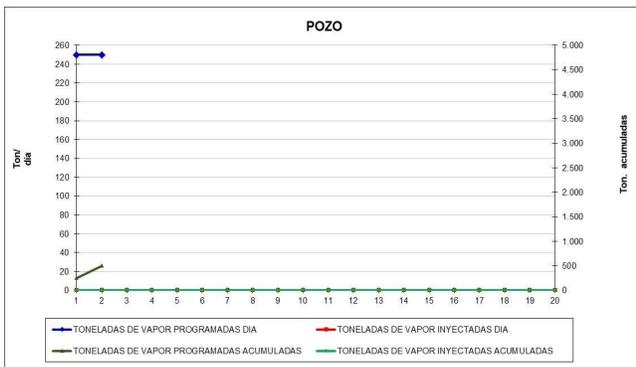
**Fig 3.** Comportamiento Presión y Temperatura en Cabezal del Pozo – Revestidor de Producción y Elongación del Pozo



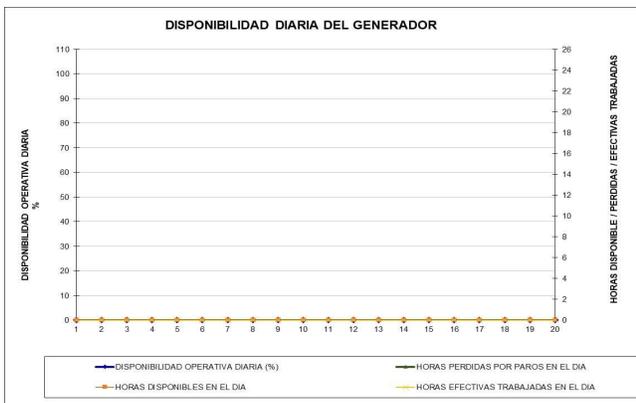
**Fig 4.** Comportamiento Calidad de Vapor y flujo de agua (GPM) en el Generador de Vapor.



**Fig 7.** - Modelo de grafica Real en el comportamiento de parámetros tomados en la Generación e Inyección de vapor.



**Fig 5.** Comportamiento de Inyección de Toneladas de vapor en el Pozo.



**Fig 6.** Comportamiento de disponibilidad operativa del Generador de vapor.

## CONCLUSIONES

- La filosofía operacional generada, garantizara el éxito, efectividad y eficiencia de la inyección de vapor.
- Para obtener resultados confiables en el proceso de Generación e Inyección de Vapor en pozos petrolíferos, es de suma importancia llevar una data confiable del proceso que permite emitir informes y reportes confiables.
- Al iniciar un ciclo de Generación e Inyección de vapor en un pozo petrolífero, se debe seguir una secuencia de actividades para un evitar contrapresiones o fallas en el sistema al momento de alinear el vapor con el yacimiento.
- Un parámetro operacional fuera del límite puede acortar la vida útil del generador, planta de tratamiento o el pozo inyector

## REFERENCIAS

1. A. Ruiz, R. Figuera, J. Rodríguez. "Operational Procedure for Steam Injection". Proyecto: CSS Pilot Project at the Tambaredjo field, Doc.: NKSW-SI-OP-01-00-001, Nakasawa Resources – Staatsolie - Suriname (2019).
2. L. Rojas, H. Yerbes, J. Bodhanwala. "Manual de Instalación, Operación y Mantenimiento del Generador de Vapor".

- Proyecto: Sistema de Generación de Vapor Portátil de 25.000.000 BTU, Doc.: 3558-GV-DG-MO-1001, Rev. 0, Nakasawa Resources – Chevron, El Tigre Edo. Anzoátegui - Venezuela (2016).
3. H. Yerbes, J. Bodhanwala. **“Procedimiento de Prueba de Desempeño del Generador de Vapor”**.  
Proyecto: Sistema de Generación de Vapor Portátil de 25.000.000 BTU, Doc.: 3558-GV-DG-PDC-1001, Rev. 0, Nakasawa Resources – Chevron, El Tigre Edo. Anzoátegui - Venezuela (2016).
  4. H. Yerbes, J. Bodhanwala. **“Procedimiento de Curado del Refractorio del Generador de Vapor”**.  
Proyecto: Sistema de Generación de Vapor Portátil de 25.000.000 BTU, Doc.: 3558-GV-DG-PCR-1001, Rev. 0, Nakasawa Resources – Chevron, El Tigre Edo. Anzoátegui - Venezuela (2016).
  5. L. Rojas, H. Yerbes, J. Bodhanwala. **“Diagrama de Causa y Efecto del Generador de Vapor”**.  
Proyecto: Sistema de Generación de Vapor Portátil de 25.000.000 BTU, Doc.: 3558-GV-DG-DCE-1001, Rev. 0, Nakasawa Resources – Chevron, El Tigre Edo. Anzoátegui - Venezuela (2016).
  6. L. Rojas, H. Yerbes, J. Bodhanwala. **“Procedimiento Previo a la Puesta en Marcha del Generador de Vapor”**.  
Proyecto: Sistema de Generación de Vapor Portátil de 25.000.000 BTU, Doc.: 3558-GV-DG-PPM-1001, Rev. 0, Nakasawa Resources – Chevron, El Tigre Edo. Anzoátegui - Venezuela (2016).
  7. L. Rojas, H. Yerbes, J. Bodhanwala. **“Diagrama de Flujo del Generador de Vapor”**.  
Proyecto: Sistema de Generación de Vapor Portátil de 25.000.000 BTU, Doc.: 3558-GV-PP-DF-1001, Rev. 0, Nakasawa Resources – Chevron, El Tigre Edo. Anzoátegui - Venezuela (2016).
  8. L. Rojas, H. Yerbes, J. Bodhanwala. **“Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI) del Generador de Vapor”**.  
Proyecto: Sistema de Generación de Vapor Portátil de 25.000.000 BTU, Doc.: 3558-GV-PP-DTI-1001, Rev. 0, Nakasawa Resources – Chevron, El Tigre Edo. Anzoátegui - Venezuela (2016).
  9. L. Rojas, H. Yerbes, J. Bodhanwala. **“Descripción de Equipos del Generador de Vapor”**.  
Proyecto: Sistema de Generación de Vapor Portátil de 25.000.000 BTU, Doc.: 3558-GV-

DG-DE-1001, Rev. 0, Nakasawa Resources – Chevron, El Tigre Edo. Anzoátegui - Venezuela (2016).