

**OPTIMIZACION DE LA CALIDAD DE VAPOR EN POZOS CON METODOS DE
ESTIMULACION HUFF & PUFF**

**ARLEN ROCIO CHANAGA QUIROZ
ANDREA CAROLINA GUARIN GIL**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA**

2015

**OPTIMIZACION DE LA CALIDAD DE VAPOR EN POZOS CON METODOS DE
ESTIMULACION HUFF & PUFF**

**ARLEN ROCIO CHANAGA QUIROZ
ANDREA CAROLINA GUARIN GIL**

**Monografía de Grado presentada como
requisito para optar el título de
Especialista en Producción de Hidrocarburos**

**Director
SAMUEL MUÑOZ
Ingeniero de Petróleos**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

*A Dios, por darme la vida,
la salud y el tiempo para cumplir con este logro
A mi familia por su apoyo constante,
su amor y su gran cariño
A ti, por tener la paciencia
y por el gran apoyo que me has dado.
Gracias por estar siempre a mi lado*

ARLEN CHANAGA

*A Dios, mi papa, mi mama,
mi hermana y José
que tienden su mano para
cada logro en mi camino.*

ANDREA GUARIN

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el conocimiento y la experiencia del Ing. Samuel Muñoz y el Ing. Manuel Quesada que direccionaron este trabajo enfocando sus conocimientos en obtener los resultados satisfactorios concluidos en esta monografía.

Agradezco a la compañía Mansarovar, por ser el lugar que nos brindó la necesidad y el laboratorio para darle solución a la misma, siempre fomentando la generación de ideas que finalizan en trabajos de investigación que optimizan la operación de nuestros procesos.

Agradezco a la UIS, por ofrecernos la oportunidad de realizar esta Especialización, a todos los docentes por dejar en nosotras un poco de sus experiencias.

ARLEN CHANAGA

Agradezco a la Universidad UIS, por habernos abierto las puertas de esta prestigiosa universidad.

Agradeciendo el apoyo y seguimiento del Ingeniero Manuel Quesada quien compartió su conocimiento para que el desarrollo de la presente monografía. Agradeciendo a Ingeniero Isaac Luque por el apoyo para el desarrollo satisfactorio del presente estudio y de la especialización.

ANDREA GUARIN

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION.....	15
1. MARCO TEORICO	18
1.1 GENERALIDADES DE CAMPO	18
1.2 TRATAMIENTO DE AGUA SUAVIZADA.....	19
1.3 PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA SUAVIZADA JAZMIN	21
1.3.1 Proceso de filtración	23
1.4 RECUPERACION TERMICA.....	26
1.4.1 Inyección de vapor.....	26
1.4.2 Ciclos de inyección de vapor.	27
1.4.3 Propiedades térmicas de agua y vapor.....	29
1.4.3.1 Temperatura de Saturación de Agua.....	29
1.4.3.2 Calor específico del agua y del vapor.	30
1.4.3.3 Calor Sensible.....	30
1.4.3.4 Calor Latente de Vaporización.....	30
1.4.3.5 Entalpía del Vapor Seco y Saturado.....	30
1.5 DETERMINACION DE LA CALIDAD DE VAPOR.....	31
1.5.1 Método de conductividad.	31
1.6 GENERACIÓN DE VAPOR	32
1.6.1 Componentes del generador de vapor.....	32
1.6.2 Equipos asociados al proceso.	33
1.6.3.1 Zona de transición.	35
1.6.3.3 Zona de convección.....	37
2. PLANTEAMIENTO Y DESARROLLO DE LAS PRUEBAS	38
2.1 PRUEBA AGUA SUAVIZADA DE GENERACION DE VAPOR	38
2.1.1 Metodología Prueba de Agua de Generación de Vapor.	38
2.1.2.1 Caracterización agua suavizada Jazmin.....	44
2.1.3 Prueba de Sostenimiento de Dureza (Segunda Fase).....	52
2.1.3.1 Desarrollo de la Prueba de sostenimiento de Dureza	53

2.1 PRUEBA DE SEPARADOR DE CONDENSADO	57
2.1.1 Separador de Condensado.....	57
2.1.2 Descripción del Separador de Condensado y Trampa termodinámica	59
2.1.3 Descripción de la prueba.	61
2.1.3.1 Instalación a la salida del generador de vapor.....	61
2.1.3.2 Instalación en cabeza de pozo.....	62
2.1.3 Simulación Línea de Vapor.....	64
2.1.3.1 Aislamientos térmicos.	66
3. RESULTADOS.....	68
3.1 Instalación del separador a la salida del generador de vapor.....	68
3.2 Instalación del separador en cabeza de pozo.....	69
3.3 Simulación líneas de vapor.....	71
4. ANALISIS TECNICO ECONOMICO DE LA OPTIMIZACION DE LA CALIDAD DE VAPOR EN POZOS CON METODOS DE ESTIMULACION HUFF & PUFF EN CAMPO JAZMIN.....	77
5. CONCLUSIONES	80
BIBLIOGRAFIA.....	84

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ubicación Campo Jazmín	19
Figura 2. Proceso de planta de tratamiento de agua Jazmín.....	22
Figura 3. Sistema de Filtración	23
Figura 4. Sistema de retención	24
Figura 5. Comportamiento de producción con ciclos de inyección	28
Figura 6. Diagrama de Molier.....	29
Figura 7. Generador de Vapor	32
Figura 8. Quemador de Generador de Vapor	34
Figura 9. Tablero de control. Generador de vapor	34
Figura 10. Manifold de inyección de vapor	35
Figura 11. Zona de Transición	35
Figura 12. Zona de radiación	36
Figura 13. Zona de convección.....	37
Figura 14. Pozo Acuífero	42
Figura 15. Tanque de Oxidación	42
Figura 16. Filtros de Arena	43
Figura 17. Tren de Suavización	43
Figura 18. Índice Stiff Davis	45
Figura 19. Grafico tendencia de sales agua campo Jazmín	50
Figura 20. Proporción de sales disueltas	51
Figura 21. Saturación de CaCO ₃ agua Campo Jazmín.....	51
Figura 22. Metodología prueba sostenimiento de dureza	53
Figura 23. Prueba de sostenimiento de dureza Campo Jazmín	54
Figura 24. Dosificación prueba	55
Figura 25. Separador tipo deflector.....	59
Figura 26. Data Sheet Separador de Condensados	60
Figura 27. Trampa de condensados	61
Figura 28. Instalación del separador a la salida del generador de vapor	61

Figura 29. Instalación separador de condensado en cabeza de pozo	63
Figura 30. Separador de Condensados	64
Figura 31. Aislamientos térmicos	66
Figura 32. Balance de masa del flujo másico del condensado	68
Figura 33. Flujo real: Humedad y arrastre de condensados	70
Figura 34. Prueba de calidades en cabeza de pozo	70
Figura 35. Perfiles de presión, temperatura y calidad de vapor	71
Figura 36. Perfiles de temperatura.....	71
Figura 37. Perfiles de calidad de vapor.....	72
Figura 38. Influencia del espesor de aislamiento	73
Figura 39. Influencia del aislamiento en la calidad del vapor	74
Figura 40. Tendencia de la presión de operación del generador	75
Figura 41. Tendencia de la temperatura con cambios en la presión de operación	75
Figura 42. Tendencia de la calidad con cambios en la presión de operación	76

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Tabla 1. Parámetros de agua suavizada	20
Tabla 2. Parámetros Pozo Acuífero	42
Tabla 3. Parámetros Tanque de Oxidación	42
Tabla 4. Parámetros Filtros de Arena	43
Tabla 5. Parámetros de Suavización	43
Tabla 6. Índice de agresividad del agua	45
Tabla 7. Índice de agresividad del agua Stiff Davis	46
Tabla 8. Índice de agresividad del agua	46
Tabla 9. Caracterización agua suavizada Campo Jazmín	47
Tabla 10. Caracterización agua suavizada Campo Jazmín (continuación)	48
Tabla 11. Relación parámetros Norma BS-2486 Vrs Campo Jazmín	49
Tabla 12. Resultados de parámetros de prueba de dureza	55
Tabla 13. Condiciones de operación	60
Tabla 14. Datos de calidades en cabeza de pozo	71
Tabla 15. Evaluación económica de los cuatros inhibidores de scale	77
Tabla 16. Evaluación económica producto actual y producto seleccionado	78
Tabla 17. Evaluación económica anual de producto seleccionado	78
Tabla 18. Costo de instalación de Separador de Condensados	79

RESUMEN

TITULO: OPTIMIZACION DE LA CALIDAD DE VAPOR EN POZOS CON METODOS DE ESTIMULACION HUFF & PUFF*

AUTOR: ARLEN ROCIO CHANAGA QUIROZ**
ANDREA CAROLINA GUARIN GIL**

PALABRAS CLAVES: Agua Suavizada, Generación de vapor, estimulación Huff & Puff, Separador de Condensados.

DESCRIPCION

La presente monografía evaluara métodos que se pueden aplicar en Campo Jazmín, con el fin de asegurar calidades de vapor superiores al 90% en la salida del generador hasta la cabeza del pozo, teniendo en cuenta parámetros como distancias de las líneas de inyección de vapor, caracterización del agua suavizada, equipos que intervienen en el proceso y parámetros de operación.

El primer método a evaluar está basado en la instalación de un separador de condensados a la salida del generador de vapor, con el cual se retiraría el contenido de humedad del vapor, de esta forma se conduciría un vapor libre de humedad. Se instalara un separador de condensados a la salida del generador de vapor y en cabeza de pozo, esto con el fin de eliminar en un 10% la humedad del vapor y verificar las pérdidas de calidad de vapor en cabeza de pozo respectivamente.

Seguidamente se evaluara las condiciones del agua suavizada para la generación de vapor, teniendo en cuenta las pruebas de caracterización que se realicen, con el propósito de optimizarla si así se requiere.

Finalmente, se obtendrán conclusiones que propondrán maneras de optimizar las pérdidas de calidad a lo largo de las líneas de distribución de calor y la optimización del agua de alimentación de los generadores de vapor y por último se realizara un cuadro de costos con el fin de implementar las recomendaciones sugeridas.

* Trabajo de grado

** Escuela de Ingeniería de Petróleos, Facultad de Ingenierías Físico Químicas, Universidad Industrial de Santander, Especialización en Producción de Hidrocarburos, Director Samuel Muñoz.

SUMMARY

TITLE: OPTIMIZATION OF THE QUALITY OF STEAM IN WELLS WITH METHOD OF STIMULATION HUFF & PUFF*

AUTOR: ARLEN ROCIO CHANAGA QUIROZ**
ANDREA CAROLINA GUARIN GIL**

KEYWORDS: Softened Water, Steam Generation, Huff & Puff stimulation, Condensate Separator.

DESCRIPTION

This monograph evaluate methods that can be applied in Jazmin Field, in order to ensure qualities of steam greater than 80% at the steam generator output to the wellhead, taking into account parameters such as long of the steam lines, characterization softened water, equipment involved in the process and operating parameters.

The first method is evaluated based on the installation of a condensate separator at the outlet of the steam generator for remove the moisture content of the steam is obtained thereby dry steam. Condensate separator at the outlet of the steam generator and wellhead was installed, this in order to eliminate 10% of the moisture steam and verify quality losses in wellhead respectively.

Subsequently the softened water conditions for steam generation is evaluated, taking into account the characterization tests carried out, in order to optimize it, if so required.

Finally, if the technical and economic studies of the different techniques to be proposed in the monograph are favorable and desirable to ensure the specified quality, it will conclude with a proposal for implementation.

* Work Degree

** School of Petroleum Engineering, Faculty of Chemical Physical Engineering, Industrial University of Santander, Specialization in Production of Hydrocarbons, Director Samuel Muñoz.

INTRODUCCION

El análisis del proceso de inyección de vapor en un yacimiento, requiere del conocimiento de la calidad de vapor inyectado, por tal razón analizar los métodos técnicos y operacionales que permitan obtener calidades en la inyección de vapor por encima de 90%, es el enfoque de la presente monografía.

Para ello nos enfocaremos en la explicación técnica, instalación y análisis de resultados del uso de los separadores de condensados a la salida de los generadores de vapor, teniendo presente que en aplicaciones de vapor saturado, el uso de estos equipos son utilizados para mejorar la calidad del vapor, prolongar la vida de los equipos como por ejemplo válvulas de control, para hacer más eficiente el proceso de transferencia de calor y realizar determinación de la calidad de vapor en Well head con el fin de determinar problemas de aislamiento en las tuberías de vapor.

En los procesos cíclicos de inyección de vapor realizados en campo Jazmín no se tiene la certeza de la calidad del vapor inyectado al pozo; la única variable conocida es la calidad de salida de los generadores de vapor correspondiente al 80%. Además se tienen longitudes máximas de tubería de vapor de 3 km desde el generador hasta el pozo que recibe, por tal razón tampoco hay seguridad de las condiciones del estado del recubrimiento aislante instalado en estas tuberías.

Determinar la calidad de vapor con los separadores condensados de vapor y optimizar la calidad de vapor entregada por el generador hacia el pozo hace parte del modelo que se va a estudiar en este trabajo.

Con el fin de entrar en el tema de la optimización de vapor entregada por el generador, se pretende realizar un estudio de mejoramiento de la calidad del agua

suavizada que ingresa a los generadores de vapor y por consiguiente optimizara la eficiencia en la salida de los mismos.

La determinación de estrategias en pro del mejoramiento de la eficiencia de la calidad del vapor a ser inyectado a la formación, como método de recobro en crudo pesado, orienta a conservar la vida útil de los equipos del proceso y a la optimización de crudo recuperado, minimizando riesgos técnicos y económicos para la compañía que podrían incurrir en pérdidas de producción y aumento de inversión de capital en mantenimientos correctivos de los equipos de la operación.

La segunda técnica está enfocada al mejoramiento de la calidad de agua suavizada que ingresara a los generadores de vapor y por consiguiente optimizara la eficiencia en la salida de los mismos.

La determinación de estrategias en pro del mejoramiento de la eficiencia de la calidad del vapor a ser inyectado a la formación, como método de recobro en crudo pesado, orienta a conservar la vida útil de los equipos del proceso y a la optimización de crudo recuperado, minimizando riesgos técnicos y económicos para la compañía que podrían incurrir en pérdidas de producción y aumento de inversión de capital en mantenimientos correctivos de los equipos de la operación.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Determinar la factibilidad técnica y económica de los métodos de estudio para el mejoramiento de la calidad de vapor inyectado.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir los dos métodos de estudio, identificando las variables que impactan la calidad del vapor generado.
- Evaluar la viabilidad de los requerimientos técnicos para obtener agua suavizada de condiciones de alta pureza, para generar vapor.
- Realizar la instalación de un separador de condensados a la salida del generador de vapor e identificar viabilidad en resultados reflejados en calidad.
- Evaluar la calidad de vapor generado, con base a las condiciones previas y posteriores a las pruebas a realizar con los dos métodos.
- Evaluar técnico y económicamente los métodos de mejoramiento de calidad de vapor a aplicar en los pozos con inyecciones Huff&Puff.

1. MARCO TEORICO

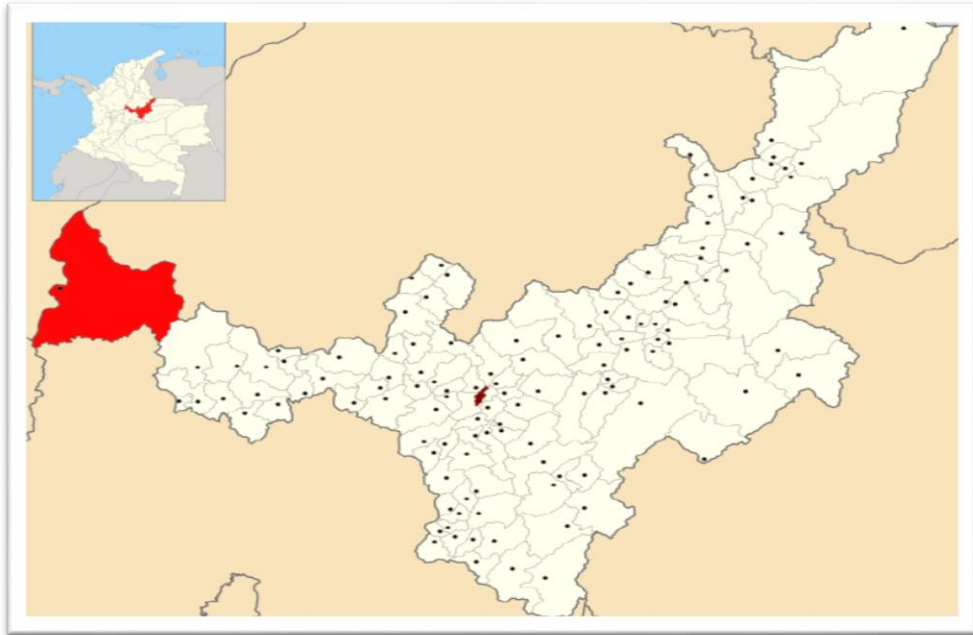
1.1 GENERALIDADES DE CAMPO¹

La contextualización del proceso en estudio se desarrollara en el Campo Jazmin de La empresa Mansarovar Energy Colombia, formada por la compañía india ONGC y la petrolera china Sinopec, dedicada a la exploración, desarrollo y producción de petróleo crudo y de gas natural en Colombia. Creada en los años 1940, con el descubrimiento y desarrollo de su primer Campo Velázquez, de crudo mediano entre 21-23 grados API, y del Campo Teca en la década de los años 1980, con crudo de unos 13 grados API, de esta forma inicia el campo de acción de MECL. A partir de su nacimiento se han desarrollado otros campos de crudo pesado, como Nare Sur, Jazmín, UnderRiver y más recientemente, los campos Girasol y Moriche, en aquel tiempo en manos de la Texas Petroleum Company.

Existen adicionalmente otras áreas ya exploradas como Chicalá, Abarco y Áreas de Moriche Buffer también de crudos pesados, con gravedades en el orden de 11 a 14 grados API, a profundidades entre 1.500 y 3.000 pies. Los Campos se encuentran ubicados en la cuenca colombiana del magdalena medio localizada en el valle interandino del Río Magdalena y comprende un área de 32.949,4 km² entre los departamentos de Santander, Boyacá, Antioquia, Bolívar y Cesar, y, en menor proporción, también se extiende por Caldas, Tolima y Cundinamarca.

¹ Disponible en : www.colombiaenergia.com/node/108

Figura 1. Ubicación Campo Jazmín



1.2 TRATAMIENTO DE AGUA SUAVIZADA

En los sistemas industriales de generación de vapor, el tratamiento del agua de alimentación y del agua contenida en los generadores de vapor representa una necesidad para garantizar una operación óptima y segura.

El tratamiento del agua de generación de vapor es fundamental para evitar problemas como corrosión, formación de incrustaciones, depósitos, y arrastre de condensado. Estos problemas están relacionados con las impurezas y contaminantes contenidas en el agua, como gases disueltos, sales y minerales que muestran que el tratamiento inadecuado del agua de es responsable de un 30% de las fallas generadores de vapor.

Los objetivos de tratamiento de agua están enfatizados en maximizar la vida útil del sistema de generación y distribución de vapor, reducir los costos de mantenimiento y garantizar una eficiencia térmica óptima.

La siguiente tabla ilustra los requerimientos que deberá satisfacer el agua de alimentación para prevenir incrustaciones y corrosión en calderas. Con base a las recomendaciones de la Norma Británica BS – 2486, la ABMA (American Boiler Manufacturing Association)².

Tabla 1. Parámetros de agua suavizada

PARÁMETRO	VALOR REQUERIDO
Dureza total	< 2 ppm
Contenido de oxígeno	< 8 ppb
Dióxido de carbono	< 25 mg/l
Contenido total de hierro	< 0,05 mg/l
Contenido total de cobre	< 0,01 mg/l
Alcalinidad total	< 25 ppm
Contenido de aceite	< 1 mg/l
pH a 25 °C	8.5 – 9.5
Condición general	Incoloro, claro y libre de agentes insolubles.

Desde el punto de vista industrial se debe tomar en cuenta la presencia de impurezas en el agua porque su presencia puede producir:

- La corrosión de los metales debido a la presencia de sustancias disueltas como el oxígeno, el cloro, etc.
- La formación de sedimentos por la presencia de iones, material particulado, etc.

² Marco Madariaga, Tratamiento de agua para calderas.

La calidad del agua depende del tipo de agua utilizada, de los métodos de tratamiento aplicados, así como de los sistemas empleados para su almacenamiento y distribución.

1.3 PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA SUAVIZADA JAZMIN³

El sistema de agua suavizada del Campo Jazmín esta abastecido de los pozos de captación de agua dulce ubicados el clúster U, AP, S, Pozo Modulo. El agua extraída de estos pozos en mención es tratada y posteriormente es usada para la generación de vapor.

El agua captada de los pozos de agua dulce inicia su proceso de filtración en el tanque de oxidación de hierro K-259.

Una vez el agua es filtrada se almacena en el tanque de almacenamiento de agua industrial K-201 de donde por medio de bombas se succiona el agua y se descarga en los trenes de suavización.

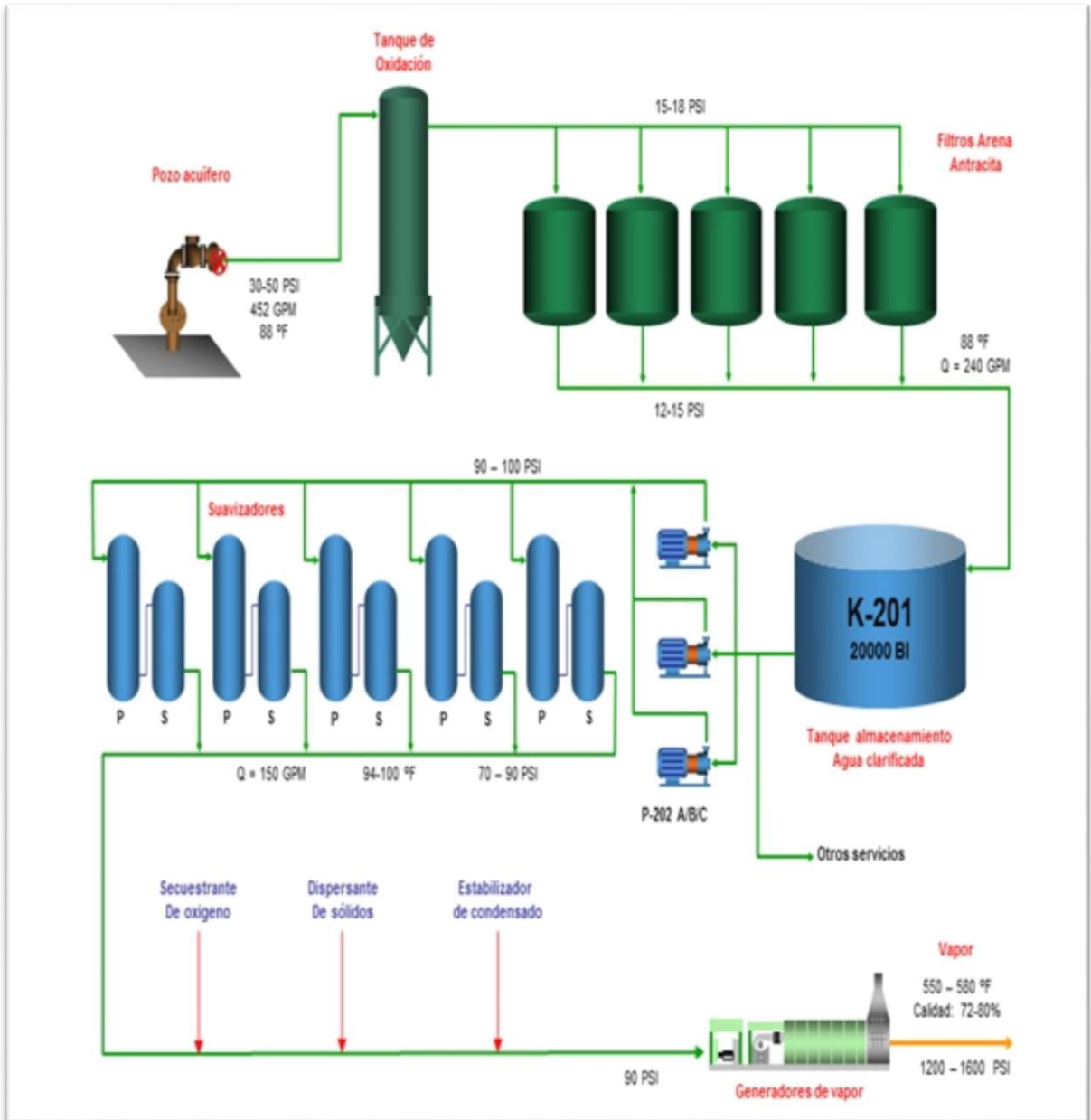
El agua suavizada es succionada por bombas y descargada a la succión de los generadores de vapor. La planta de tratamiento de agua tiene como propósito retirar partículas finas, material coloidal presente en suspensión y otras sustancias presentes en dilución, además de ablandar el agua mediante la remoción de dureza con el fin de obtener un efluente que cumpla con las características de calidad para generación de vapor.

La planta de tratamiento de agua industrial del módulo Jazmin está dividida en los siguientes sistemas:

³ Manual Operativo Planta De Agua Industrial Mtb Campo Jazmín MA-OPE-016

- Sistema de filtración
- Sistema de Suavización

Figura 2. Proceso de planta de tratamiento de agua Jazmín



1.3.1 Proceso de filtración. El sistema de filtración está compuesto por el tanque de oxidación y cuatro filtros de arena-antracita

El tanque de oxidación es el primer equipo de filtración que recibe el agua de los pozos, y es allí donde se debe oxidar el hierro presente en el agua antes de entrar a la batería de los filtros arena-antracita.

Figura 3. Sistema de Filtración



Los filtros de arena-antracita son unidades diseñadas para el tratamiento de agua en aplicaciones industriales.

Las hidrofalutas son resistentes a la corrosión, el rendimiento está ligado a variables como la temperatura, presión, composición del agua y otros factores.

Existe un tanque de almacenamiento de agua industrial denominado K-201 con una capacidad de 2000 Bls; el agua allí depositada es limpia proveniente de los filtros, que posteriormente será transferida hacia el tren de suavización.

1.3.2 Sistema de suavización. La cabeza de succión del sistema de suavización está en el tanque de almacenamiento K-201, el propósito de los trenes de suavización es preparar agua con cero de dureza.

El sistema de suavización comprende los trenes de suavización constituidos por los suavizadores primarios, los suavizadores secundarios, el tanque de salmuera de regeneración, los medidores de flujo y las bombas de servicio y retrolavado y enjuague rápido y las bombas de salmuera.

El agua que se utiliza para generar vapor contiene minerales disueltos (las sales metálicas se disuelven en el agua separándose en iones) principalmente calcio y magnesio considerados como dureza que pueden hacer que el agua no sea apta para el uso de los generadores. Los bancos de suavización operan sobre el principio llamado intercambio iónico, que remueve estos minerales.

El agua dura se hace pasar por la resina hasta que haya perdido su poder de intercambio, la resina se lava en contracorriente haciéndola expandir lo suficiente para que libere cualquier sólido suspendido proveniente del agua cruda. La resina se regenera hasta recobrar su capacidad original de intercambio y se lava para desalojar los productos que aún quedan como consecuencia de la regeneración.

En esta aplicación, la resina está constituida por moléculas insolubles formadas por un anión polimérico y un catión de sodio que poseen gran afinidad por cationes

divalentes (tales como calcio y magnesio) que se encuentran en baja concentración en el agua. Como resultado de lo anterior ocurre una reacción química en el momento en el que la resina hace contacto con el agua dura y reemplaza sus cationes de sodio por los de calcio y magnesio, lo que produce un ablandamiento del agua.

El agua una vez libre en su mayor parte de dureza, es trasladada por medio de bombas a los generadores de vapor.

1.4 RECUPERACION TERMICA

Se conoce por recuperación térmica, a todo proceso donde se inyecta u origina energía térmica en el yacimiento, con el fin de aumentar la recuperación de petróleo. El objetivo básico en la aplicación de métodos térmicos es la reducción de la viscosidad del petróleo con la finalidad de mejorar su movilidad; por lo tanto, son especialmente adecuados para petróleo viscosos (5 – 20 API), aunque son usados para petróleo de hasta 45 API.

Otros beneficios obtenidos con los métodos térmicos, además de la reducción de viscosidad del petróleo, son la reducción de la saturación residual de petróleo a consecuencia de la expansión térmica, aumento de la eficiencia areal por efecto de la mejora en la razón de movilidad, destilación con vapor, craqueo térmico, etc.

1.4.1 Inyección de vapor. Es un proceso mediante el cual se suministra energía térmica al yacimiento inyectando vapor de agua. El proceso de inyección puede ser en forma continua o alternada.

Uno de los procesos de inyección de vapor más utilizados es el de inyección cíclica o alternada, también denominado remojo con vapor o estimulación con vapor. Esta técnica consiste en la estimulación individual a cada pozo mediante inyección

intermitente de vapor. En una forma simple, el proceso consiste en inyectar vapor a una formación productora a través de un pozo productor, por un período determinado de tiempo. Después de esto, el pozo es puesto de nuevo en producción.

Como se sabe, el petróleo fluye hacia los pozos productores debido a que la presión en el fondo del pozo es menor que la presión del yacimiento. En yacimientos de crudos pesados, la mayor caída de presión entre el yacimiento y el fondo del pozo ocurre en una zona muy cercana al hoyo del pozo.

La inyección de vapor reduce significativamente esta caída de presión debido al incremento de temperatura cerca del hoyo del pozo. Este incremento de temperatura, además, reduce la viscosidad del petróleo, lo cual permite que aumente el flujo del mismo hacia el fondo del pozo. De esta forma la tasa de producción es aumentada sustancialmente.

Algunas consideraciones importantes en inyección cíclica de vapor son las siguientes:

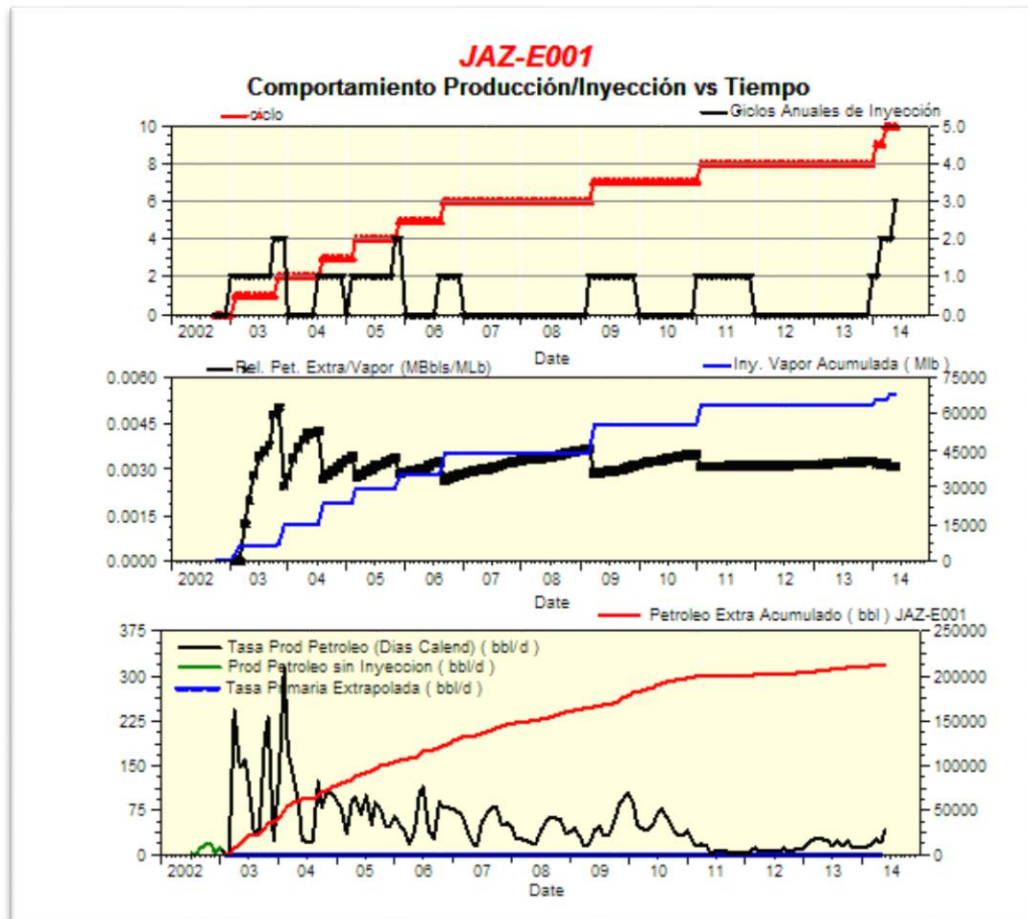
- Cantidad de vapor inyectado por pie de formación.
- Período de tiempo que el pozo debe estar cerrado, para máximo beneficio
- Tipo de completamiento de pozo para obtener un mayor beneficio del uso de vapor.

1.4.2 Ciclos de inyección de vapor. Actualmente en Campo Jazmín, se inyectan diariamente alrededor de los 4500 MMBTU con una tasa de inyección máxima por pozo de 1000 MMBTU, dependiendo este volumen de inyección del espesor de arena y de los parámetros operacionales del generador.

Campo Jazmín inicio perforación en su primera Fase llamada Jazmín Básico en el año 2002, acumulando a la fecha entre los 10 a los 12 ciclos de inyección.

En la figura se muestra el comportamiento de los ciclos de inyección en el pozo llamado JAZ-E001 y del comportamiento de la producción después de realizado un ciclo.

Figura 5. Comportamiento de producción con ciclos de inyección



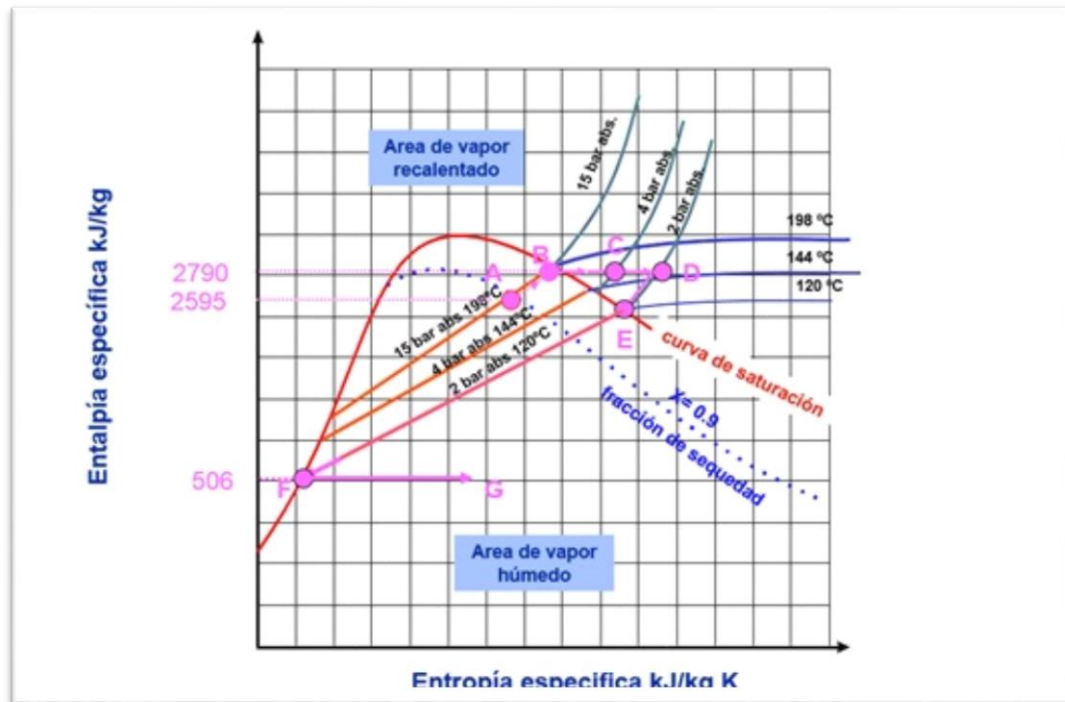
Determinar cuando el pozo debe ser alistado para realizar inyección de vapor depende primordialmente de las condiciones de temperatura, BSW y producción de fluido del mismo.

Las condiciones en frío determinantes para realizar un ciclo de inyección pueden variar entre los 100F – 120F, 30%-50% BSW y 70 – 50 BFPD.

Las temperaturas en Well head después del inicio del ciclo de inyección esta entre los 180F – 200F, 80% - 98% de BSW y 200 – 300 BFPD.

1.4.3 Propiedades térmicas de agua y vapor. A continuación se discuten brevemente las propiedades térmicas de agua y de vapor.

Figura 6. Diagrama de Molier



1.4.3.1 Temperatura de Saturación de Agua. Es la temperatura a la cual se produce la ebullición (vaporización) del agua a una determinada presión. También se le denomina punto de ebullición y aumenta al aumentar la presión.

1.4.3.2 Calor específico del agua y del vapor. Se define por calor específico a la capacidad que tiene una sustancia para absorber calor y se mide como el número de BTU necesarios para aumentar la temperatura de una libra de una sustancia en 1 F. El calor específico de una sustancia no es constante, sino que depende de la temperatura a la cual se mide.

Para el vapor, el calor específico es mucho menor, del orden de 0.56 BTU/lb-F, y al igual que el del agua (1.0 BTU/lbF) varían muy poco con temperatura, por lo que para propósitos prácticos pueden considerarse constantes.

1.4.3.3 Calor Sensible. Si se mantiene la presión constante y se le agrega en forma continua calor a un líquido, da como resultado un aumento de la temperatura, hasta que se alcanza la temperatura de saturación correspondiente a esa presión constante. Este calor utilizado en aumentar la temperatura hasta la de saturación, se denomina calor sensible y aumenta al aumentar la presión.

Considerando la entalpía (contenido de calor) del agua igual a cero a 32 F (0 oC) y suponiendo que el calor específico del agua no varía con temperatura, el calor sensible, puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$h_w = C_w (T_s - 32) C$$

donde h_w es la entalpía del agua saturado o calor sensible en BTU/lb, C_w el calor específico del agua, 1.0 BTU/lb - oF.

1.4.3.4 Calor Latente de Vaporización. Es la cantidad de calor que debe suministrarse a una libra de un líquido a la temperatura de saturación, para pasar al estado de vapor. Depende de la presión, disminuyendo a medida que la presión aumenta.

1.4.3.5 Entalpía del Vapor Seco y Saturado. La suma del calor sensible del agua saturada y del calor latente de vaporización del agua, constituye la entalpía del

vapor seco y saturado, i.e. la cantidad de calor contenida en una libra de vapor seco a la temperatura de saturación.

1.5 DETERMINACION DE LA CALIDAD DE VAPOR

La calidad del vapor es un valor difícil de determinar con exactitud. En la actualidad existen varios métodos para medir la calidad del vapor, sin embargo, no existe ninguno que pueda considerarse simple y sencillo. Para cumplir con los objetivos de esta monografía se describirá el método de conductividad, por ser el método utilizado en campo para determinar la calidad a la salida de los generadores de vapor:

1.5.1 Método de conductividad. La conductividad del agua depende de la concentración de sales disueltas en ella. Notando el incremento de la conductividad entre el agua de alimentación y la parte líquida del vapor a la descarga de la caldera, se puede determinar la calidad, mediante la ecuación:

$$f_{st} = 1.0 - \frac{\sigma \text{ en el agua de alimentación}}{\sigma \text{ en la parte líquida del vapor}}$$

Donde σ es la conductividad. Este método es similar al método de determinación de los cloruros, excepto que se toman en cuenta todas las sales disueltas en lugar de cloruros solamente. Sin embargo, el método de la conductividad no es correcto si el Bicarbonato de Sodio NaHCO_3 está presente en el agua de alimentación. El bicarbonato de sodio se descompone en NaCO_3 o NaOH , los cuales tienen diferentes conductividades, este error se corrige neutralizando la solución.

Dado que la comparación básica en este método radica en que las sales disueltas son concentradas en la fase líquida en proporción directa al volumen de agua vaporizado. El método es útil para el control y monitoreo continuo de la calidad.

1.6 GENERACIÓN DE VAPOR⁴

El generador de vapor es un equipo que transforma la energía química en energía térmica. Este equipo recibe agua sin dureza de la planta de agua industrial, su función es producir vapor para disminuir la viscosidad de los fluidos por medio de la transferencia de calor a los pozos productores de hidrocarburos, con el fin de hacer más fácil la extracción de los fluidos. La calidad del vapor generada debe estar entre el 77% – 80% y los líquidos de arrastre entre 23% – 20%.

Figura 7. Generador de Vapor



1.6.1 Componentes del generador de vapor. El generador de vapor consta de la vasija y los equipos asociados al proceso:

- Equipos asociados al proceso:
 - Bomba Quintuplex
 - Quemador

⁴ Manual Operativo De Generación De Vapor MTB Campo Jazmín MA-OPE-023

- Tablero de control
- Manifold de salida

- Vasija: Conformada por tres zonas:
 - Zona de transición.
 - Zona de radiación.
 - Zona de convección.

1.6.2 Equipos asociados al proceso. El agua necesaria para la generación de vapor es tomada de la planta de agua industrial cumpliendo con las especificaciones requeridas para este proceso (0 dureza en el agua). Esta actividad se realiza mediante una bomba de alimentación de desplazamiento positivo (Quintuplex), dicha bomba cuenta con su tablero de control independiente al del generador.

El generador de vapor también cuenta con un quemador el cual inyecta aire para sacar los gases de combustión de la zona de radiación hacia la atmósfera. Este puede funcionar tanto con gas como con crudo combustible, cuando el generador va a funcionar con crudo combustible este requiere de un precalentamiento para obtener una viscosidad de 100 a 150 su en la boquilla del quemador.

Para el control del generador de vapor existe localmente un tablero de control (no se realiza monitoreo ni control desde el SCADA), el cual cuenta con un Panel View en donde se visualiza toda la operación del equipo (variables de control, alarmas, tendencias).

Figura 8. Quemador de Generador de Vapor



Figura 9. Tablero de control. Generador de vapor



En la salida del generador de vapor se encuentra el manifold de distribución, este es básicamente un arreglo de líneas (tipo flauta) que se desprenden de la línea de salida del generador y que por la acción de las válvulas manuales (apertura / cierre) se da o no el paso del vapor hacia los pozos que están provistos para inyección.

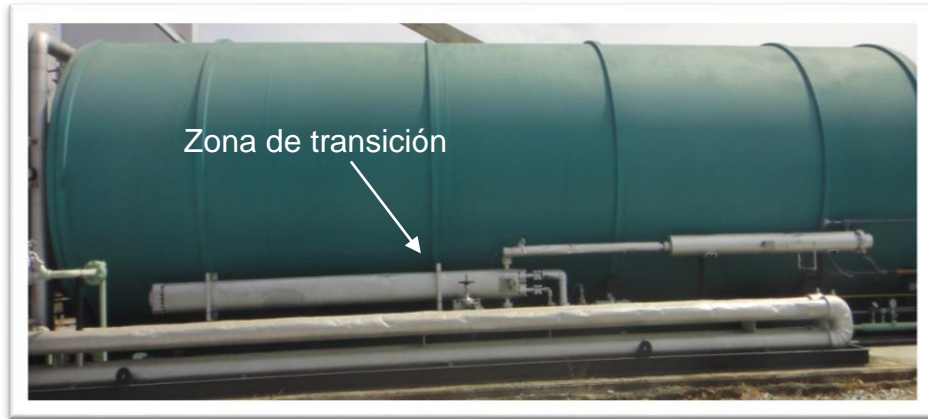
Figura 10. Manifold de inyección de vapor



1.6.3 Vasijas.

1.6.3.1 Zona de transición. Esta zona es un intercambiador de calor tipo doble tubo, utilizado para incrementar la temperatura del agua de alimentación por encima del punto de rocío del gas de alimentación, para prevenir condensación de agua en el gas combustible que produce depósitos corrosivos ácidos. En esta zona la bomba Quintuplex hace que el agua circule a temperatura ambiente en la zona de transición, la cual se mezcla con una fracción del agua de la zona de radiación elevándola a una temperatura óptima de 220 °F para que ingrese a la zona de radiación.

Figura 11. Zona de Transición



1.6.3.2 Zona de radiación. La zona de radiación es un área cilíndrica con tubos horizontales colocados a su alrededor para igualar la cantidad de calor absorbida, los soportes de los tubos son de aleaciones de alto grado, ya que están expuestos a altas temperaturas por la acción del quemador. El área de transferencia en la zona de radiación es normalmente del 60% a 65% del total de la carga de transferencia. La pared refractaria refleja el calor a los tubos, reduciendo las pérdidas de calor a través de la pared de la cámara. En esta zona el agua ingresa con una temperatura de 220 °F y se eleva a temperaturas mayores a 380 °F, para pasar posteriormente a la zona de convección.

Figura 12. Zona de radiación



1.6.3.3 Zona de convección. Los gases de combustión de la zona de radiación entran a la zona de convección pasando primero por los tubos de choque y posteriormente a los tubos de superficie extendida. Debido a la transferencia de calor en esta zona, el vapor alcanza temperaturas superiores a 550 °F y la presión se eleva superando los 1000 psi, consiguiéndose vapor de alta calidad para el proceso. La calidad del vapor hace referencia al contenido de agua en fase líquida y se expresa en porcentaje (%).

Figura 13. Zona de convección



2. PLANTEAMIENTO Y DESARROLLO DE LAS PRUEBAS

2.1 PRUEBA AGUA SUAVIZADA DE GENERACION DE VAPOR

2.1.1 Metodología Prueba de Agua de Generación de Vapor. Actualmente una de las razones para que la eficiencia de los generadores de vapor este en un máximo de 80% es porque el agua utilizada aún mantiene sales disueltas que afectan la integridad del generador, y lo cual repercute en las condiciones de entrega de vapor, por tal razón una de las alternativas se enfoca en mantener suficiente agua pura al fluido en el interior del generador para que arrastren las sales que se pueden incrustar en el equipo y para que disminuya el fenómeno de incrustación en los elementos internos del generador, al producir el vapor; así de esta manera se utilizaría vapor saturado y no vapor sobre calentado.

El vapor sobre calentado significa que toda el agua se ha convertido en vapor y no existe agua en estado líquido en ninguna forma. En un generador de vapor, en el caso que el vapor sea sobre calentado saldría una corriente de vapor con todas las sales concentradas, por tal razón si se tuviese la oportunidad de tener agua totalmente limpia, esta se puede evaporar suficientemente al 100% y no generaría residuos que se estén pegando a las líneas, teniendo en cuenta que en Campo Jazmín el sistema es acuotubular, refiriéndose al flujo del agua por los tubos.

Lo que se busca es que cuando el agua ingresa hacer el recorrido disminuya el riesgo que la tubería se tape, con la formación de incrustaciones lo cual reflejaría grandes dificultades para generar vapor por que la transferencia de vapor disminuiría debido al depósito de sales como carbonatos, calcio, magnesio, sulfatos, sulfatos de bario, sulfato de hierro, oxido de silicio o sílice.

Por las condiciones anteriormente expuestas se debe ubicar en la entrada del generador de vapor un punto de inyección de scale o inhibidor de incrustación al

flujo de agua que sale de la planta de agua suavizada con el fin de disminuir y/o eliminar las sales disueltas que se puedan pegar en el interior y puedan generar una barrera lo cual no permitiría una transferencia adecuada de calor, disminuyendo la pérdida de eficiencia del generador, debido a la pérdida de calor, pérdida de integridad y daño de los tubos por la llama que se encuentra en contacto directo en el interior con los tubos, además una de las consecuencias más graves de la afectación de los tubos es su ruptura internamente que generaría una mezcla de vapor con gases y ocasionaría una explosión por expansión.

El enfoque del primer método a estudiar está basado en controlar las condiciones del agua antes de ingresar al generador de vapor ya que si se tienen controlados estos parámetros, se podría aumentar la eficiencia del vapor y se lograría tener una calidad mejor teóricamente.

La metodología se enfocara en el proceso del agua que se suavizara. El agua que sale del pozo de captación, tiene unas ciertas características; este flujo es direccionado hacia la planta de suavización donde resultan a la salida magnesio y calcio en cero, quedando disueltos sulfatos, sílice, hierros, bario y carbonatos que son los que se quieren controlar.

Inicialmente se determinara la tendencia del agua suavizada de Campo Jazmín, seguido se realizara un análisis de caracterización con el fin de determinar los elementos que resultan luego del proceso de suavización y de esta forma se determinara cuáles sales residuales se deben contrarrestar.

Adicional se realizara un estudio de sostenimiento de dureza, el cual estará enfocado en una prueba de laboratorio con cuatro (4) inhibidores de scale de la industria química, aplicados a una muestra de agua suavizada de Campo Jazmín, con el fin de identificar cuál de estos productos incluido el que actualmente se aplica, demuestra mejores resultados en obtener agua suavizada con el mínimo de sales

disueltas y sosteniendo la condición de baja dureza dentro del generador de vapor, mitigando la afectación de la integridad de los tubos por donde circula el agua; de los resultados de esta prueba se escogerá el mejor producto para ser aplicado como método de mejora de la pureza del agua para la generación de vapor.

El método a ser aplicado se estructura en las siguientes etapas:

- Descripción del agua por la primera fase de tratamiento como lo es la planta de tratamiento de agua suavizada por medio de filtros de arena y de bancos de suavización del módulo ubicado en Campo Jazmín.
- Descripción del agua en la segunda fase enfocada al tratamiento químico con inhibidores de scale o inhibidores de incrustación ubicados a la salida de la planta de agua suavizada, con el fin de entregar a la succión de la bomba del generador agua de mejor pureza, para la generación de vapor. En esta fase se describirá la prueba de laboratorio de sostenimiento de dureza.

2.1.2 Tratamiento Planta de Agua Suavizada (Primera Fase). El proceso para la generación de vapor utilizado en los pozos con métodos de estimulación Huff & Puff, tiene su principio en unos pozos de los cuales se capta el agua subterránea, en el caso de Campo Jazmín cuatro pozos denominados Pozo del Módulo, AP, U, S. El agua tomada de estos pozos es direccionada hacia las dos plantas de agua ubicadas en el centro del campo, específicamente en el módulo de tratamiento.

Las plantas de agua constan de un tanque de oxidación donde se debe oxidar el hierro y luego el fluido pasara por los cuatro filtros de arena a presión con el fin de retirar las partículas finas.

una vez filtrada el agua pasa a ser almacenada en un tanque de 2000 Bbls, el agua se toma con bombas y se envía finalmente al sistema de suavización compuesto por cuatro trenes de suavización (por cada planta) cada uno con un banco primario y un banco secundario el fin de estos trenes es aportar agua con cero de dureza (

Calcio y magnesio principalmente), mediante el principio de intercambio iónico entre los minerales disueltos y la resina que contienen en su interior los bancos, y a este intercambio se le conoce como ablandamiento del agua.



La resina de intercambio iónico utilizada en el sistema de trenes de suavización opera en el ciclo del sodio para intercambiar iones de calcio y magnesio por iones de sodio, es suministrada en la forma de partículas esférica amarillo claro, virtualmente perfectas en apariencia del grano.

Se debe tener en cuenta que las plantas de suavización se saturan y las condiciones a la salida de los bancos reportan más de cero de dureza, se realiza el proceso de regeneración con salmuera.

Luego que el agua es suavizada es direccionada hacia los generadores de vapor. A continuación se describen los parámetros del agua en el proceso correspondiente al flujo por la planta de tratamiento:

- Pozo Acuífero

Figura 14. Pozo Acuífero



Tabla 2. Parámetros Pozo Acuífero

Parámetro	Unidad	valor
pH		8.66
Dureza total	ppm CaCO ₃	10.0
Conductividad	μS/cm	410
Hierro total	ppm Fe ⁺⁺	0.01
Sulfito	ppm SO ₃	0.0
Temperatura	°F	90
Presión	psi	30-50

- Tanque de Oxidación

Figura 15. Tanque de Oxidación



Tabla 3. Parámetros Tanque de Oxidación

Parámetro	Unidad	valor
pH		8.67
Dureza total	ppm CaCO ₃	10.0
Conductividad	μS/cm	410
Hierro total	ppm Fe ⁺⁺	0.01
Sulfito	ppm SO ₃	0.0

- **Filtros de Arena**

Figura 16. Filtros de Arena



Tabla 4. Parámetros Filtros de Arena

Parámetro	Unidad	valor
pH		8.67
Dureza total	ppm CaCO ₃	10.0
Conductividad	μS/cm	410
Hierro total	ppm Fe ⁺⁺	0.01
Sulfito	ppm SO ₃	0.0

- **Tren Suavización**

Figura 17. Tren de Suavización



Tabla 5. Parámetros de Suavización

SUAVIDADOR PRIMARIO		
Parámetro	Unidad	valor
pH		8.68
Dureza total	ppm CaCO ₃	1.0
Conductividad	μS/cm	400
Hierro total	ppm Fe ⁺⁺	0.01
Sulfito	ppm SO ₃	0.0
SUAVIDADOR SECUNDARIO		
Parámetro	Unidad	valor
pH		8.68
Dureza total	ppm CaCO ₃	0.0
Conductividad	μS/cm	400
Hierro total	ppm Fe ⁺⁺	0.01
Sulfito	ppm SO ₃	0.0

2.1.2.1 Caracterización agua suavizada Jazmin⁵. Para la caracterización inicial de agua luego del proceso de ablandamiento es importante determinar el nivel de agresividad de dicha agua para lo cual se utilizó el método del índice de Langelier y Índice de Stiff Davis; los dos índices nombrados determinan el equilibrio del agua, se realizó con los dos índices con el fin de confirmar este parámetro; cabe resaltar que el índice de Stiff Davis es un método mejorado del índice de Langelier. De esta forma se describirá inicialmente el índice de Langelier:

- ✓ Si el índice es 0, el agua está perfectamente equilibrada.
- ✓ Si el índice es negativo, indica que el agua es corrosiva.
- ✓ Si el índice es positivo, indica que el agua es incrustante

El Índice de Langelier mide la descomposición del carbonato de cálcico, en bicarbonato cálcico y la tendencia a depositar carbonato de calcio ó disolver carbonato de calcio; basado en el pH, la alcalinidad y la dureza. Este índice es usado en la estabilización del agua para controlar tanto la corrosión como la escala de deposición.

$$IL = pH - pHs$$

Donde pH es el pH medido del agua del circuito y pHs es el pH del agua cuando está saturada con carbonato de calcio. El pHs puede definirse como:

$$pHs = 9.3 + a + b - c - d$$

a = es una función de los sólidos concentrados totales

b = es una función de la temperatura del agua (Dentro del equipo)

c = es una función del calcio como dureza (ppm CaCO₃)

d = es una función de la alcalinidad

⁵ Control de la calidad del agua, Índice de Langelier, <http://www.construsur.com.ar/>

La tendencia de agresividad del agua de Campo Jazmín se determinó inicialmente con el índice de langelier y luego por el índice de Stiff Davis el cual se ilustra a continuación:

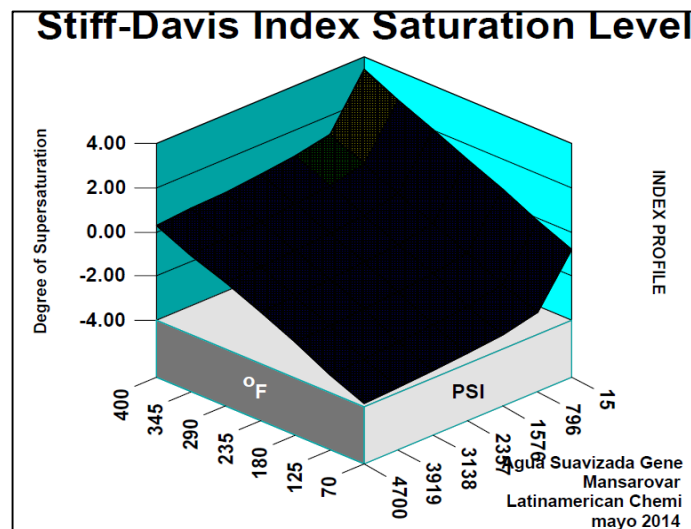
El índice de langelier determinado según los parámetros de caracterización⁶ realizados al agua de Campo Jazmin, arroja un valor de 2.25 positivo, lo cual indica que la tendencia del agua es incrustante.

Tabla 6. Índice de agresividad del agua

INDICE	ANTEK
STIFF DAVIS	4,00
LANGELIER	2.25

Indice Stiff Davis:

Figura 18. Índice Stiff Davis



⁶ Datos de caracterización del agua según Tabla 7

El índice de Stiff Davis al igual que el índice de Langlier tiene su base en el concepto de nivel de saturación, los parámetros para la evaluación de este índice se describen a continuación:

Tabla 7. Índice de agresividad del agua Stiff Davis

Índice de Saturación	Conclusión
Negativo	El agua no se encuentra saturada con CaCO_3 . La formación de incrustaciones es poco probable.
Positivo	El agua está sobresaturada con CaCO_3 . Esto indica la formación de incrustaciones.
Cero	El agua está en equilibrio con CaCO_3 .

La determinación de la agresividad del agua, con la tendencia anterior permite ver en un rango de presiones y temperaturas y aplicarlo a las condiciones en las cuales se trabaja en Campo, para este caso la presión y temperatura que se describe en la siguiente tabla:

Tabla 8. Índice de agresividad del agua

AGUA SUAVIZADA	PRESION Psig	TEMPERATURA ° F
Entrada Zona Convección Generador de vapor	1400	190
Salida Zona Convección Generador de vapor	1300	450
Zona de Radiación GP	1200	570
Salida de Generador de vapor	1200	570
Cabeza de Pozo	1050	450
Fondo de Pozo	900	350

De acuerdo a los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones se concluye el comportamiento incrustante que maneja el agua suavizada de Campo Jazmin, este parámetro se deberá tener en cuenta para controlarlo y de esta manera preservar la vida útil del generador de vapor e incrementar la eficiencia del mismo.

Por otro lado se determina la tendencia de las sales disueltas en el agua para generación de vapor. El agua proveniente de los bancos de suavización contiene sales que no pueden ser removidas en su totalidad por la planta, estas sales son la principal causa de incrustaciones⁷ en los internos de los generadores de vapor y por lo tanto se dificulta la óptima eficiencia del equipo.

A continuación se exponen los resultados de la caracterización realizada al agua de campo Jazmin luego del proceso de suavización:

Tabla 9. Caracterización agua suavizada Campo Jazmín

PARAMETRO	UNIDADES	AGUA SUAVIZADA
TEMPERATURA	°C	25
pH a 25°C	unidades	8.7
CONDUCTIVIDAD	µs/cm	421
OXIGENO DISUELTO	mg/L O ₂	5.07
TURBIEDAD	NTU	0.59
SALINIDAD A 25°C	mg/L	200
RESISTIVIDAD	ohm.m	23.7
DENSIDAD	g/mL	0.998
GRAVEDAD ESPECIFICA A 20°C		1
DIOXIDO DE CARBONO (ALCALINIDAD)	mg/L	<10
HIDROXIDO TOTAL	mg/L	<4
ACIDO SULFIDRICO	mg/L H ₂ S	<1.5
ALCALINIDAD TOTAL	mg/L CaCO ₃	170

⁷ Resultado de la determinación del índice de agresividad del agua Campo Jazmin.

Tabla 10. Caracterización agua suavizada Campo Jazmín (continuación)

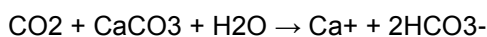
PARAMETRO	UNIDADES	AGUA SUAVIZADA
TEMPERATURA	°C	25
pH a 25°C	unidades	8.7
CONDUCTIVIDAD	µs/cm	421
OXIGENO DISUELTO	mg/L O ₂	5.07
TURBIEDAD	NTU	0.59
SALINIDAD A 25°C	mg/L	200
RESISTIVIDAD	ohm.m	23.7
DENSIDAD	g/mL	0.998
GRAVEDAD ESPECIFICA A 20°C		1
DIOXIDO DE CARBONO (ALCALINIDAD)	mg/L	<10
HIDROXIDO TOTAL	mg/L	<4
ACIDO SULFIDRICO	mg/L H ₂ S	<1.5
ALCALINIDAD TOTAL	mg/L CaCO ₃	170
DUREZA CALCICA	mg/L CaCO ₃	<2
DUREZA MAGNESICA	mg/L CaCO ₃	<2
DUREZA TOTAL	mg/L CaCO ₃	<2
BICARBONATOS	mg/L CaCO ₃	138
CARBONATOS	mg/L CaCO ₃	32.4
CLORUROS	mg/L CL ⁻	29.2
SULFATOS	mg/L SO ₄ ⁻²	<5
NITRATOS	mg/L NO ₃	<0.100
SOLIDOS DISUELTOS TOTALES	mg/L	203
SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	mg/L	<8
SOLIDOS TOTALES	mg/L	218
BARIO	mg/L	<0.096
BORO	mg/L	0.63
CALCIO	mg/L	0.152
ESTRONCIO	mg/L	<0.025
HIERRO	mg/L	0.157
MAGNESIO	mg/L	<0.049
SODIO	mg/L	91.8
POTASIO	mg/L	0.49
SILICE	mg/L	31.9

Con respecto a esta caracterización podemos determinar:

Tabla 11. Relación parámetros Norma BS-2486 Vrs Campo Jazmín

PARAMETRO	UNIDAD	VALOR BS – 2486	Valor Campo Jazmín
Dureza Total	ppm	<2	<2
Contenido de Oxígeno	ppb	<8	5075
Dióxido de Carbono	mg/l	<25	<10
Contenido Total de Hierro	mg/l	<0.005	0.157
Alcalinidad Total	ppm	<25	170
pH a 25°C		8.5 - 9.5	8.7
Condición general		incolore, claro y libre de agentes insolubles	Turbiedad baja

Con base a la tabla anterior, en la cual se agrupo la caracterización actual del agua suavizada de campo Jazmín Vrs los valores permitidos por la norma BS-2486, se obtienen valores permitidos de Dureza total, Dióxido de carbono, contenido de hierro, pH y las condiciones generales de turbiedad. Sin embargo el contenido de oxígeno supera el valor permitido, por cual se realizó seguimiento y se obtuvo que el valor en el punto de la toma de la muestra es alto en oxígeno debido a que el punto de inyección de secuestrante de oxígeno se encuentra aguas abajo del punto en el cual se tomó la muestra a analizar, de igual forma la alcalinidad total excede lo permitido por la norma siendo este uno de los parámetros a enfatizar para eliminar en el tratamiento del agua, teniendo en cuenta que los compuestos que más contribuyen a la alcalinidad son los bicarbonatos (HCO₃), puesto que se forman fácilmente por la acción del dióxido de carbono atmosférico sobre los materiales carbonatados en presencia de agua, a través de la siguiente reacción:



Es decir que las aguas adquieren su alcalinidad por medio de la disolución de minerales básicos carbonatados, los que además aportan al medio sus cationes mayoritarios, como Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ .

De igual forma es importante verificar la cantidad de Carbonato de Calcio ya formado pues este inevitablemente va a depositarse en cualquier lugar, sobre todo donde la temperatura sea alta.

Con el fin de determinar la tendencia de las sales disueltas con más influencia en el agua suavizada de campo Jazmín, y de esta forma enfocar los parámetros que pueden afectar la pureza del agua dentro del generador y por consiguiente la eficiencia del mismo, a continuación se ilustra las sales de mayor proporción en el agua y seguido se describe la tendencia del CaCO_3 en diferentes rangos de temperatura y presión, siendo el carbonato una de las sales por lo cual el agua tiene tendencia a la incrustación:

Figura 19. Grafico tendencia de sales agua campo Jazmín

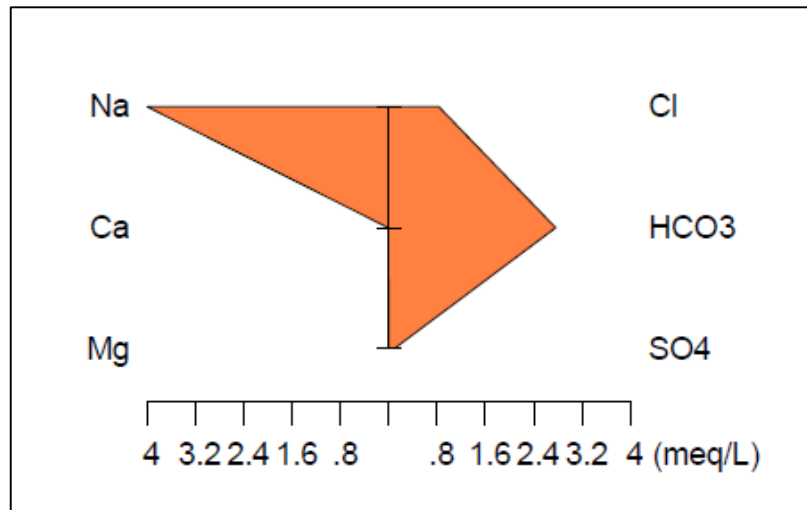
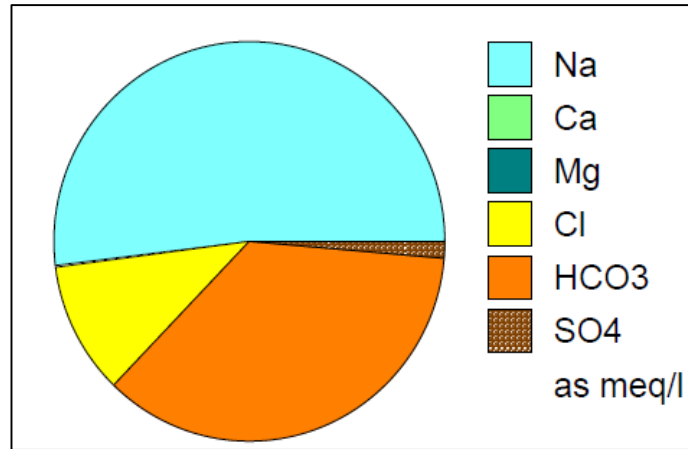


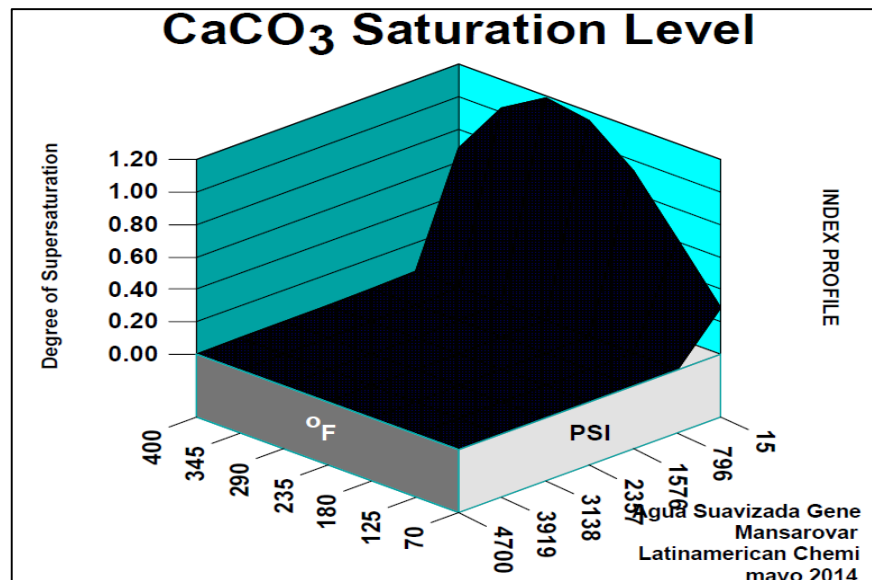
Figura 20. Proporción de sales disueltas



Los valores más representativos son el Na y el HCO₃, lo cual indica la alta alcalinidad que presenta el agua en estudio representada en la tendencia a incrustar, según los índices de Langelier y Stiff Davis que basan su método en la alcalinidad que presente el agua.

Ca CO₃:

Figura 21. Saturación de CaCO₃ agua Campo Jazmín



A pesar de los resultados obtenidos según los índices de agresividad del agua, donde se indica la tendencia incrustante, se puede objetar igualmente que esta tendencia aunque exista es mínima, por lo que el impacto es bajo y se observa una baja tendencia incrustante por carbonato de calcio.

De acuerdo al equilibrio del agua a ser incrustante y a las sales presentes luego del proceso de la planta de suavización, se puede definir que la alcalinidad que presenta el agua la convierten en incrustante. Por tal razón el enfoque estaría determinado en el tratamiento del agua para disminuir el depósito de scale (así sea mínimo) dentro del generador.

2.1.3 Prueba de Sostenimiento de Dureza (Segunda Fase). En la determinación del control del agua incrustante según la caracterización anteriormente descrita, se realizara la prueba de sostenimiento de dureza, la cual se realizara con inhibidores de scale de tres compañías químicas y la compañía que actualmente aplica el inhibidor en la salida de la planta de tratamiento de agua; para este caso denominaremos estos cuatro productos como X00401, X00604,X00717,X00318.

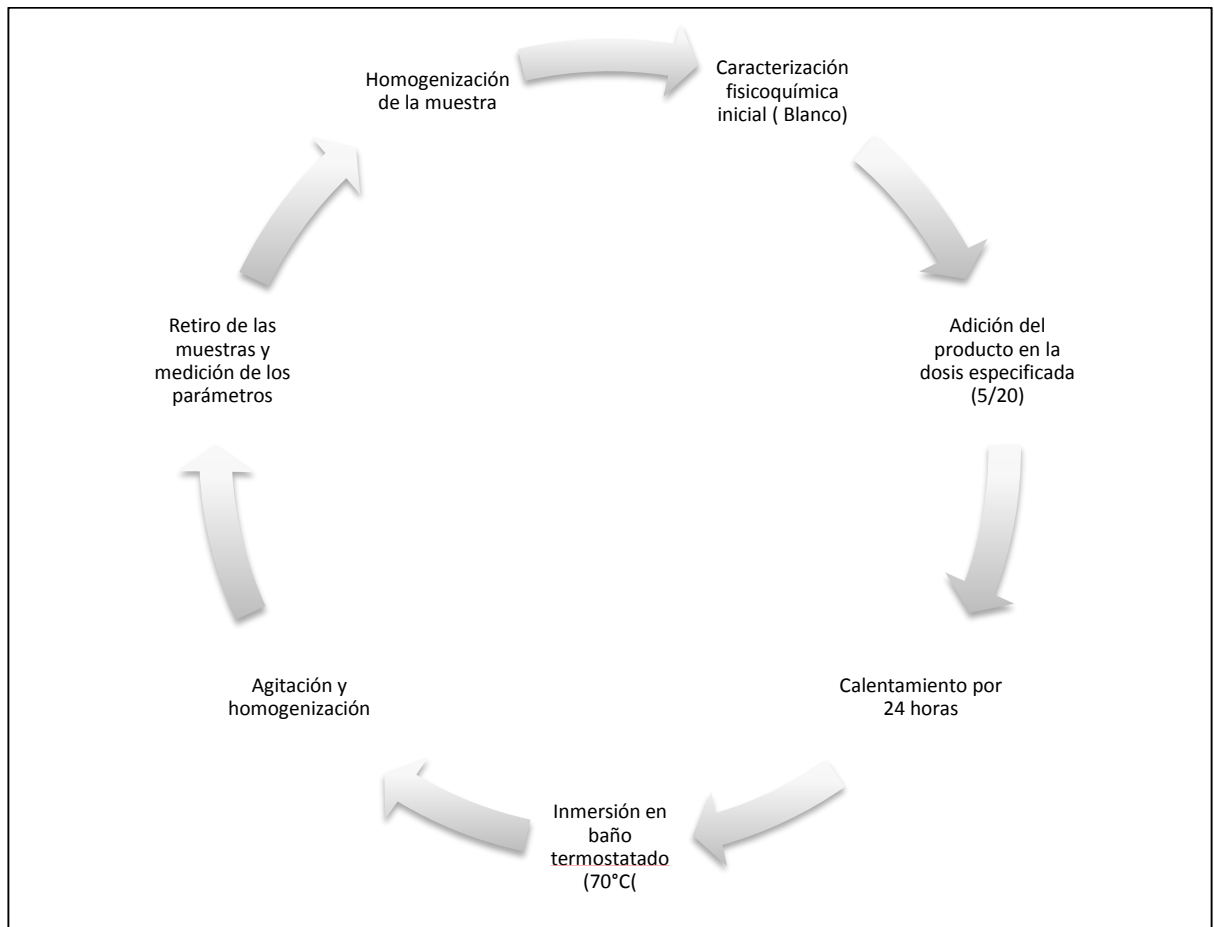
El objetivo de la prueba a realizarse es identificar, de entre cuatro productos evaluados, aquel que permita mantener las mismas concentraciones de los parámetros fisicoquímicos del agua suavizada del campo Jazmín, luego de la aplicación de dosis de 5 y 20 ppm de cada uno de los tratamientos.

El procedimiento con el cual se desarrollara dicha prueba está basado en:

1. Realizar mezclas del agua suavizada del campo Jazmín con cada uno de los productos químicos siguiendo el protocolo de mezclado (Similar a una prueba de botella de campo).

2. Medir los parámetros fisicoquímicos seleccionados en el agua suavizada campo Jazmín antes y después del tratamiento con cada uno de los productos.

Figura 22. Metodología prueba sostenimiento de dureza



2.1.3.1 Desarrollo de la Prueba de sostenimiento de Dureza. Siguiendo el protocolo de la realización de las pruebas de laboratorio a dos diferentes dosificaciones se obtiene los siguientes datos, con los diferentes productos químicos seleccionados:

Obtenida la muestra de agua a la salida de la planta de tratamiento (5 galones), se inicia la prueba de laboratorio con la muestra inicial como blanco, para determinar los parámetros fisicoquímicos iniciales sin la adición de inhibidores de scale.

Figura 23. Prueba de sostenimiento de dureza Campo Jazmín



De la misma manera se toma muestras iguales para iniciar con cada producto la dosificación mínima de 5 ppm y al máximo de 20 ppm, con el fin de predecir la dosis óptima, y determinar el comportamiento de cada uno en un rango de temperatura, similar a la condiciones de Campo. Se mantiene allí por un tiempo representando el tiempo de residencia del generador de 24 horas, y luego se escoge el inhibidor de scale me mantenga en solución la dureza cálcica y magnésica del agua.

Figura 24. Dosificación prueba



Tabla 12. Resultados de parámetros de prueba de dureza

PARAMETROS	BLANCO	X00604 (5 ppm)	X00604 (20 ppm)	X00717 (5 ppm)	X00717 (20 ppm)	X00401 (5 ppm)	X00401 (20 ppm)	X00318 (5 ppm)	X00318 (20 ppm)
SULFATOS	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
ALCALINIDAD TOTAL	177	173	175	176	176	159	180	179	178
DUREZA CALCICA	4.4	4.2	4	4	4.4	<2	4.3	4.6	4.7
DUREZA TOTAL	4.9	4.4	4.8	4.2	5.2	<2	5.2	5.9	5.4
BARIO	<0.096	<0.096	<0.096	<0.096	<0.096	<0.096	<0.096	<0.096	<0.096
HIERRO	<0.073	<0.073	<0.073	<0.073	<0.073	<0.073	<0.073	<0.073	<0.073

Se observa que la alcalinidad se mantiene luego de todos los tratamientos aplicados respecto de la inicial para el blanco, en los casos en los que se observa un ligero aumento de 1 a 3 ppm, estos pueden ser atribuidos a la incertidumbre analítica del método. El mantenimiento de la alcalinidad indica que no se presentan

incompatibilidades entre los productos evaluados y el agua suavizada del campo jazmín.

La concentración inicial de los cationes hierro y bario en el agua sin tratamiento es inferior al límite de cuantificación del método, así como en todas las muestras medidas después de aplicado el tratamiento. Esto indica que el aporte a la dureza total por parte de especies que crean la dureza permanente no es significativo, y que las variaciones en la dureza de las aguas después de los tratamientos son debidas a variaciones en las concentraciones de las especies del ácido carbónico, Es decir, a desplazamientos en los equilibrios de bicarbonato, dióxido de carbono y carbonato.

El hecho de que las concentraciones medidas del ion sulfato sean todas inferiores a los límites de cuantificación del método confirma el hecho de que las variaciones en la dureza son debidas a especies que causan la dureza temporal (HCO_3^- , CO_3^{2-}).

En cuanto a la dureza cálcica, el producto X00604 y el producto X00318 cumplen el objetivo de mantener estable el parámetro. El producto X00401 a una dosis de 5 ppm es el de desempeño inferior, luego del tratamiento la dureza reportada fue inferior al límite de cuantificación del método.

De esta forma se determinó que el bario, el hierro y el sulfato no sufren modificaciones luego de los tratamientos, indicando que no son relevantes en términos de precipitación o formación de scale de sulfatos. Así mismo todos los productos evaluados a dosis de 5 y 20 ppm mantienen la alcalinidad de la muestra inicial luego del tratamiento.

Finalmente se determinó que el producto apto para el tratamiento del agua incrustante de campo Jazmín es el X00604 a una dosis de 20 ppm.

2.2 PRUEBA DE SEPARADOR DE CONDENSADO

2.2.1 Separador de Condensado. Instalar un separador de vapor a la salida de los generadores de vapor tendrá como objetivo retirar el contenido de humedad de vapor, de esta forma se conducirá un vapor libre de humedad. Al llegar a los clúster, en el final de la línea de distribución de vapor, se instalaría una trampa de vapor que permita retirar el condensado formado hasta allí.

Vapor húmedo es el vapor que contiene cierto grado de agua, y es una de las principales preocupaciones en cualquier sistema de vapor. Aunque un drenaje cuidadoso y trampas de condensado pueden remover la mayor cantidad de agua, no pueden manejar las pequeñas gotas suspendidas en la corriente de vapor. Para remover estas gotas suspendidas se instalan separadores en las líneas de flujo.

El vapor producido es un generador diseñado para producir vapor saturado es inherentemente húmedo.

Adicionalmente, siempre existirá una pérdida de calor en las líneas en las líneas de distribución, lo que causa que el calor condense. Las partículas de condensado eventualmente precipitaran hacia el fondo de la tubería formando una película de agua.

La presencia de agua en el vapor puede causar varios problemas:

- ✓ Las gotas de agua que viajan a las altas velocidades que maneja el vapor erosiona los asientos de las válvulas y accesorios. Las gotas de agua también ocasionan incremento en la corrosión.
- ✓ Aumenta la incrustación de las impurezas arrastradas por el agua.
- ✓ Operación errática de las válvulas de control y los medidores de flujo.

Algunos estudios reportan una eficiencia entre el 98% y el 100% de eficiencia cuando el separador es instalado a las condiciones de diseño.

La remoción del condensado desde el inicio disminuye el flujo transportado en la tubería y permite tener mayores distancias de inyección, con una calidad estimada a la llegada del 90% aproximadamente.

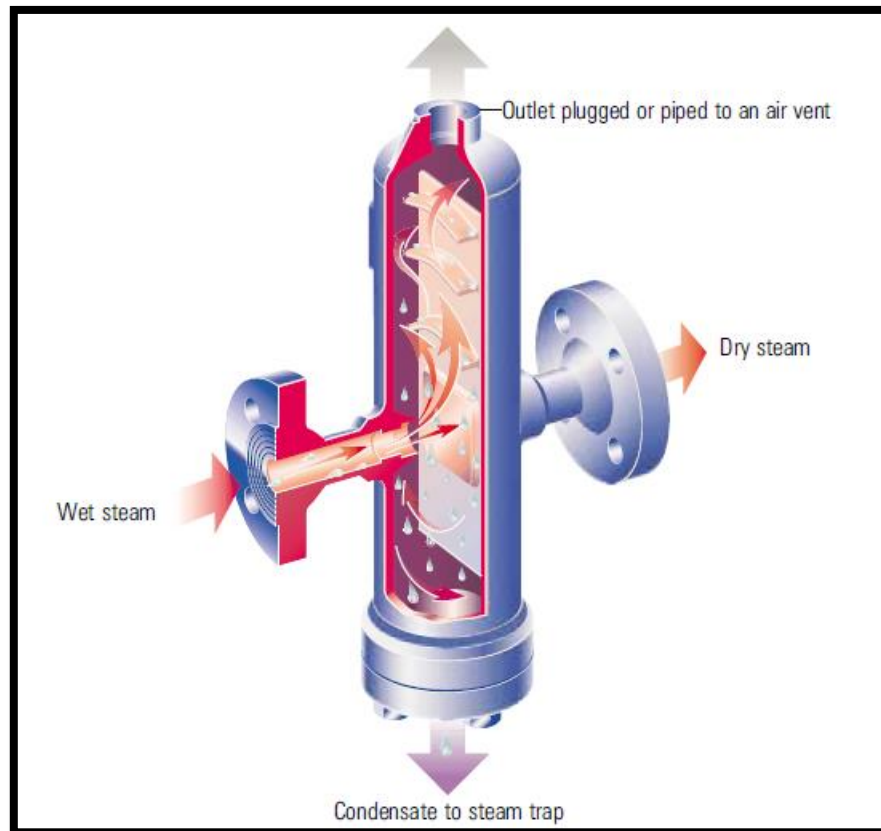
Hay un número considerable de diferentes diseños de separador, todos ellos tratan de remover la humedad que permanece suspendida en el flujo de vapor, el cuál no puede ser removido por drenaje. Hay tres tipos de separadores usados en sistemas de vapor:

- Tipo Deflector
- Tipo Ciclón
- Tipo Coalescencia

El tipo de separador utilizado para realizar esta prueba es un deflector o de paletas.

Un separador tipo deflector consiste de un número de placas deflectoras, los cuáles ocasionan que el flujo cambie de dirección varias veces a medida que pasa a través del cuerpo del separador. Las gotitas de agua suspendidas tienen una mayor masa y una inercia mayor que el vapor; Por lo tanto, cuando hay un cambio en la dirección de flujo, el vapor seco fluye alrededor de los deflectores y las gotas de agua se acumulan en los deflectores. Además, como el separador tiene una gran área de sección transversal, hay una reducción resultante en la velocidad del fluido. Esto reduce la energía cinética de las gotas de agua, y la mayoría de ellos se caerán por suspensión. El condensado se acumula en la parte inferior del separador, donde se drena a través de una trampa de vapor.

Figura 25. Separador tipo deflector



2.2.2 Descripción del Separador de Condensado y Trampa termodinámica. El S7 es un separador de tipo deflector de acero al carbono ANSI 900 de 3" y trampa HP150, para la eliminación eficaz de líquidos arrastrados en sistemas de vapor, aire y gas.

Este separador maneja un flujo nominal de 1000 MBTU/h de vapor con una calidad del 80% a una presión de 1200 psig y una temperatura de 569 F.

Se requiere un purgador adecuado o escurridor líquido para drenar el condensado/ líquido recogido en función de la aplicación:

Tabla 13. Condiciones de operación

Condiciones de Operación: 1214 psia @ 568.7°F y x=80%			
	Variabilidad (Turndown):		3.64:1
Condición	Flujo en MM BTU/D	Flujo en lb/hr	Caída de presión en PSI
Flujo Máximo	1,214.67	47,706	23.122
Flujo Normal	1,000.00	39,275	15.672
Flujo Mínimo:	317.46	12,469	1.579

Figura 26. Data Sheet Separador de Condensados

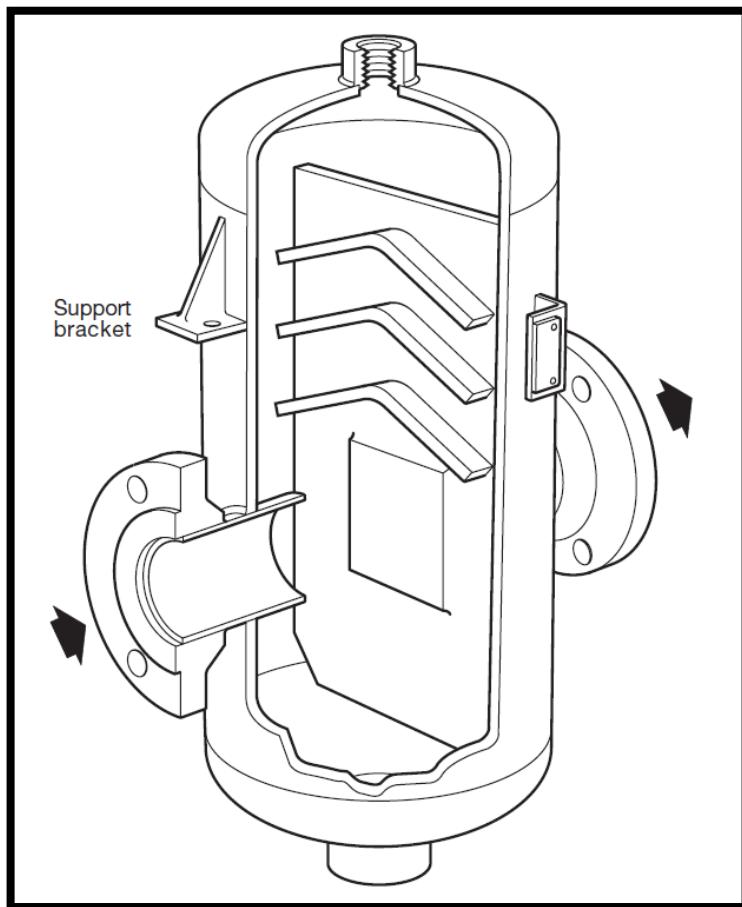
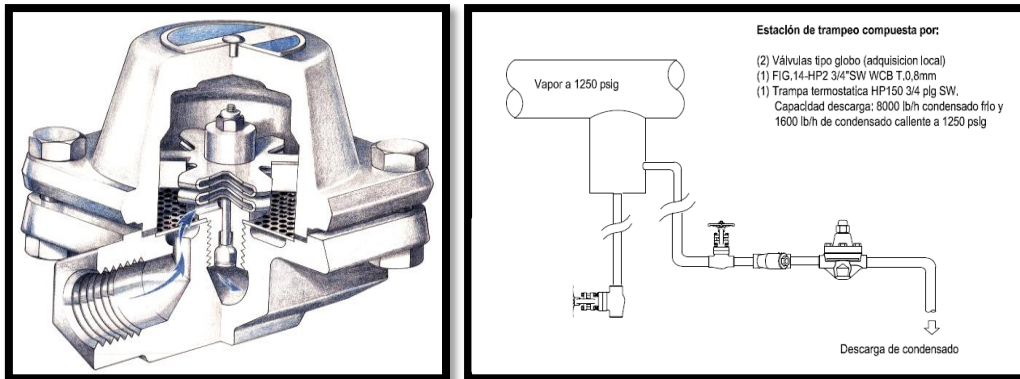


Figura 27. Trampa de condensados



2.2.3 Descripción de la prueba. Se realizó dos pruebas con el separador de condensado, este separador maneja un flujo nominal de, estas dos pruebas se describen a continuación.

2.2.3.1 Instalación a la salida del generador de vapor. Con el fin de garantizar la evacuación y el arrastre de los condensados que se originan desde el generador de vapor y de esta forma, garantizar aguas abajo del separador vapor saturado seco, se instaló el separador de condensado a la salida de la línea de vapor.

Figura 28. Instalación del separador a la salida del generador de vapor



La capacidad de generación es de 50 MBTU/h, esto equivale teóricamente a generar 51500 lb/h. La presión de operación del sistema a evaluar va desde 800 psi hasta 1250 psi.

La calidad de vapor actualmente manejada por los generadores de vapor es de 80%, (20% agua). Teóricamente serían 10300 lb/h de condensado y 41200 lb/h de vapor.

Inicialmente se obtuvo específicamente las condiciones del sistema. Al instalar el separador con su respectiva trampa, se mejora la calidad del vapor aguas abajo.

Se da inicio la prueba cerrando lentamente las válvulas de la línea principal y abriendo las válvulas del By-pass donde está instalado el sistema de separación de condensado a la salida del generador, esto con el fin de mejorar la calidad del vapor, con esta instalación se espera un mejoramiento del 98%. La idea principal es analizar cuanta carga de condensación se retira al inicio del sistema.

El principal objetivo de esta prueba es determinar cuanta carga de condensados se retira al inicio del sistema, para ello se realizó un montaje con consta de los siguientes pasos:

1. Conexión del separador de condensados en conexiones de 3" a la línea de vapor, en cabeza de pozo
2. Dos válvulas de 3" orbit con el fin de independizar el flujo de vapor hacia el separador o hacía la línea de vapor.
3. Una trampa de vapor instalada después en la descarga de condensado
4. Tanque para medición de condensados recuperados

2.2.3.2 Instalación en cabeza de pozo. El problema comienza desde el generador de vapor y si es este es punto crítico donde se retira buena cantidad de energía que afecta el normal comportamiento del proceso o es por el largo recorrido del

vapor por la tubería aislada sin conocer la eficiencia real del aislamiento instalado desde el año 2001, sin tener trampeo hasta la entrada de los clúster ocasionando que el vapor llegue con una baja eficiencia térmica resultando en una inyección de vapor a los pozos no muy eficiente.

Figura 29. Instalación separador de condensado en cabeza de pozo

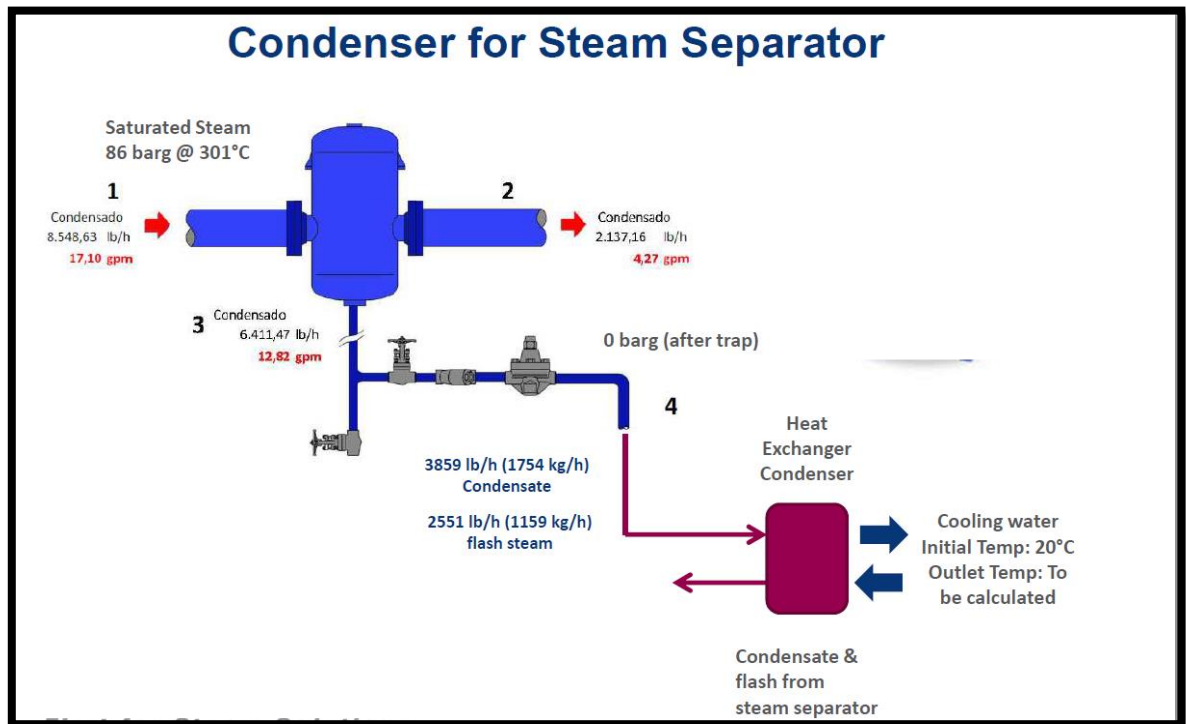


El principal objetivo de esta prueba era definir la calidad de llegada en cabeza de pozo desde el generador de vapor, para ello se realizó un montaje con consta de los siguientes pasos:

1. Conexión del separador de condensados en conexiones de 3" a la línea de vapor, en cabeza de pozo
2. Dos válvulas de 3" orbit con el fin de independizar el flujo de vapor hacia el separador o hacía la línea de vapor.
3. Una trampa de vapor instalada después en la descarga de condensado
4. Instalación de serpentín o intercambiador de vapor
5. Construcción de línea de agua de alimentación requerida para enfriar el condensado dentro del intercambiador de calor

6. Tubería tubing capilar para realizar medición de calidad siguiendo la metodología por conductimetría

Figura 30. Separador de Condensados



2.2.3 Simulación Línea de Vapor. Se ha desarrollado un estudio general, usando el software de simulación de procesos PIPEPHASE, donde han sido chequeadas las caídas de presión, el perfil de temperatura y la calidad a lo largo de los 3000 m en líneas de 6" teniendo en cuenta condiciones de procesos como:

Presión salida del generador:	1200 – 1500 psi
Temperatura promedio generador:	570 F
Calidad a la salida del generador:	80%
Consumo de agua en el generador:	80 – 100 GPM
Temperatura de Aire (Promedio):	90 F
Coef. Conductividad de Aire:	0,015 BTU/h ft F

Coef. Conductividad del aislamiento: 0,0217 BTU/h ft F
Espesor de aislante: 2”

Criterios:

Presión de Well head: 1000 psi

Velocidad máxima en tubería Vel. Erosional

Al ubicar las corrientes en un domo termodinámico de temperatura vs Entalpía, se observa que a una mayor presión de operación, mayor será la energía contenida en el vapor y por consiguiente mayor la transferencia energética por libra de vapor producida.

Sin embargo, este set lo establece el requerimiento operacional dependiendo del (los) pozo (s) a ser estimulado (s).

Debido a que el caso base se ha construido a partir de las condiciones de operación determinadas por diseño, y partiendo de una condición inicial en cuanto a recubrimientos, que no se ajustan 100% a las condiciones actuales del campo, donde la presión de los generadores depende de las distancias de inyección y la presión a la que recibe la formación; y por otra parte, el recubrimiento lleva instalado varios años y no existe información sobre su degradación, se ha decidido incluir en los modelos de simulaciones factores que pueden afectar la calidad del vapor en superficie, como son:

- Espesor de Aislamiento
- Presión de Operación del Generador
- Carga de condensación en las tuberías

2.2.3.1 Aislamientos térmicos. Las cañuelas y láminas de Poliuretano son fabricadas con espuma de poliuretano auto extingüible con una densidad media de 35 kg/m³ presentadas en forma de cañuelas y láminas planas que se caracterizan por el bajo factor de conductividad térmica (K), rigidez, peso liviano y resistencia mecánica.

Las cañuelas de poliuretano están diseñadas para el aislamiento térmico de procesos, equipos y tuberías.

Figura 31. Aislamientos térmicos



El deterioro del aislante térmico en el tiempo es una de las preguntas de la cual el fabricante del mismo no posee una respuesta exacta al respecto. Las razones que afectan a los aislamientos instalados es el abuso mecánico, que hace que se pierda su espesor y por ende sus características de eficiencia.

Las altas pérdidas energéticas en la red de distribución principal de vapor debido a aislamiento deteriorado por el mal estado de la chaqueta protectora son una de las razones principales de las posibles pérdidas de calidad de vapor desde el generador

hacia el pozo. Identificar la calidad de entrada al pozo redundaría en establecer las condiciones del aislante en la línea de vapor.

El diagnóstico del estado del aislamiento térmico se puede realizar mediante análisis termo gráfico avanzado de aislamientos mediante un software especializado que resulta en una especificación de los aislamientos, chaquetas, recubrimientos y acabados en tuberías y accesorios.

Las líneas de vapor se construyeron aplicando un criterio adecuado para las pérdidas de presión. La principal fuente de desviación del comportamiento lineal de la corriente son los loops de expansión localizados cada 100 m y con dimensiones de 2,5 m de alto x 2,5 m de largo.

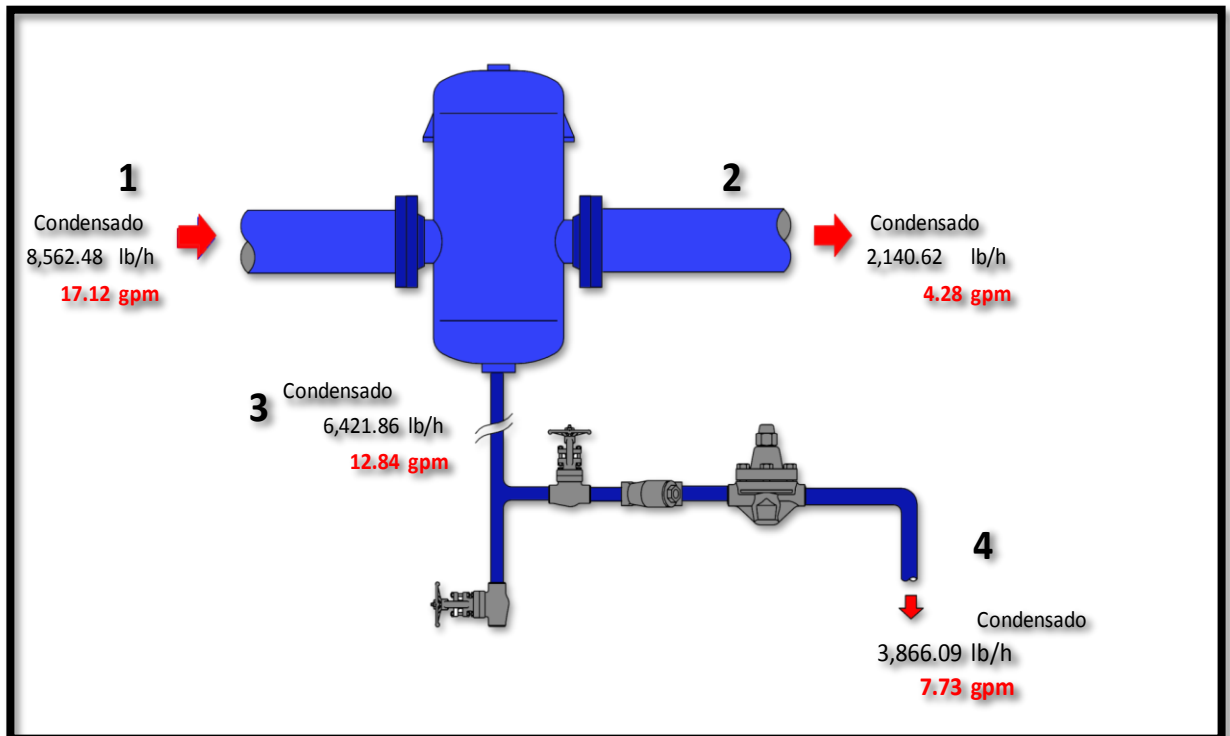
3. RESULTADOS

Los resultados expuestas en las pruebas realizadas con el separador de condensados, dependiendo del punto de instalación, se obtienen los siguientes resultados,

3.1 INSTALACIÓN DEL SEPARADOR A LA SALIDA DEL GENERADOR DE VAPOR

Se realizó un archivo en Excel con el fin de determinar el flujo másico de condensado que debía evacuar el separador de condensados con el fin de cumplir la finalidad de optimización de calidad.

Figura 32. Balance de masa del flujo másico del condensado



1. El flujo de condensado de 12 gpm corresponde al caudal máximo que se podría obtener antes de la trampa para vapor. Esto siempre y cuando la caldera mantenga una producción permanente de vapor de 42743 lb/h. Si la cantidad de vapor demandada para la caldera disminuye (como normalmente debe acontecer), la cantidad de condensado a drenar lo hará igualmente. Esto lo puedes visualizar variando la celda de capacidad en MMBtu/h de la hoja de cálculo.
2. Los 42743 lb/h de vapor producidos (80 gpm suministrados en agua a la caldera) corresponden a datos de capacidad NOMINAL del generador. Esta capacidad de producción depende y varía por factores como la temperatura de agua de alimentación y la presión de operación del generador.

De acuerdo a lo anterior, sería conveniente saber cuál es el flujo promedio de vapor producido por el generador de vapor. Para esto necesitaremos verificar las lecturas diarias promedio de flujo instantáneo de vapor que se registran en el medidor a la salida de la caldera. Solo de esa manera podremos hacer el cálculo más preciso de lo que se tendría “teóricamente” que drenar por la trampa.

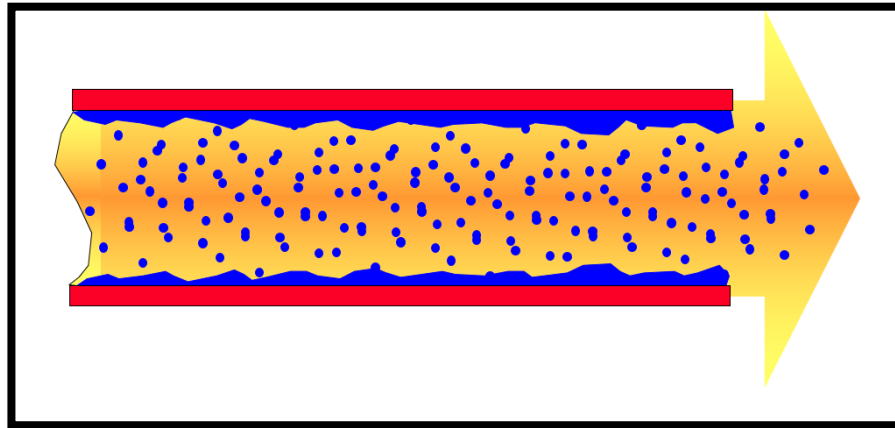
La condensación del flash es compleja por los temas de seguridad y salubridad involucrados. Se podría pensar en un intercambiador de calor. Solo hay que tener en cuenta que cualquier elemento condensador de flash que se contemple instalar afecta la presión diferencial en la trampa y consecuentemente su capacidad de descarga.

3.2 INSTALACIÓN DEL SEPARADOR EN CABEZA DE POZO

Los resultados de calidad de vapor se vieron afectadas por las cargas de condensación en tuberías y por la eficiencia del aislamiento térmico instalado en la tubería de distribución.

Es bien sabido que la presencia de agua en el vapor reduce la energía calorífica por unidad de masa, disminuyendo la transferencia de calor.

Figura 33. Flujo real: Humedad y arrastre de condensados



En la tabla y la gráfica siguiente se detalla los datos recolectados en la prueba realizada con el separador de condensados instalado en cabeza de pozo.

Figura 34. Prueba de calidades en cabeza de pozo

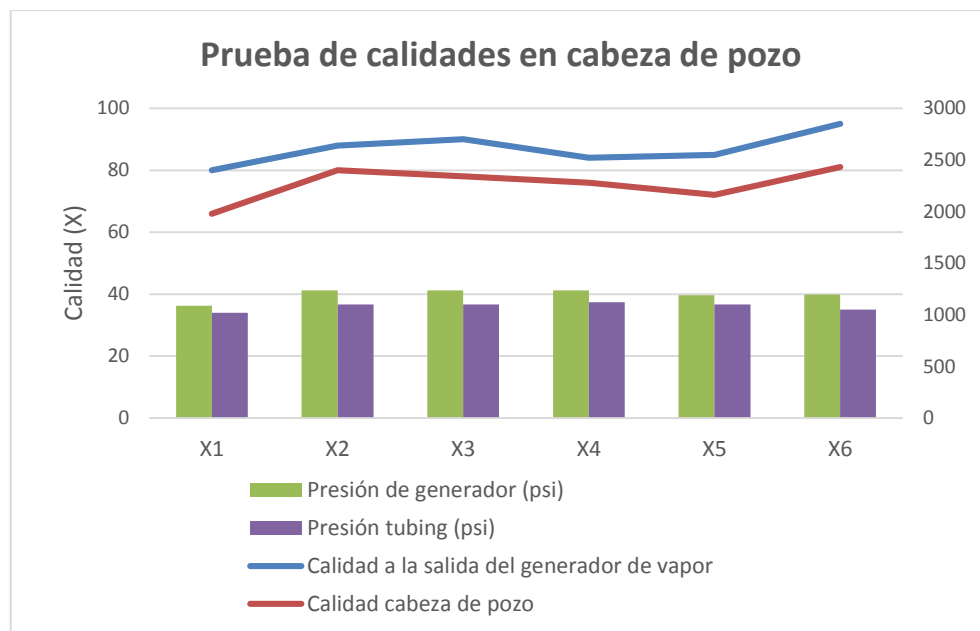


Tabla 14. Datos de calidades en cabeza de pozo

Toma de muestra	Distancia generador y pozo (m)	Presión de generador (psi)	Presión tubing (psi)	Temperatura de generador (F)	Temperatura tubing (F)	Calidad a la salida del generador de vapor	Calidad cabeza de pozo	Pérdida de calidad por 1 km de tubería
X1	610	1088	1018	555	534	80	66	23
X2	610	1235	1100	559	500	88	80	13
X3	610	1235	1100	559	500	90	78	20
X4	610	1235	1120	566	541	84	76	13
X5	610	1189	1100	566	535	85	72	21
X6	610	1197	1050	559	541	95	81	23

3.3 SIMULACIÓN LÍNEAS DE VAPOR

A continuación se mostraran los perfiles de presión, temperatura y calidad del vapor a lo largo de la línea. El principal criterio es la presión del vapor en cabeza de pozo,

Figura 35. Perfiles de presión, temperatura y calidad de vapor

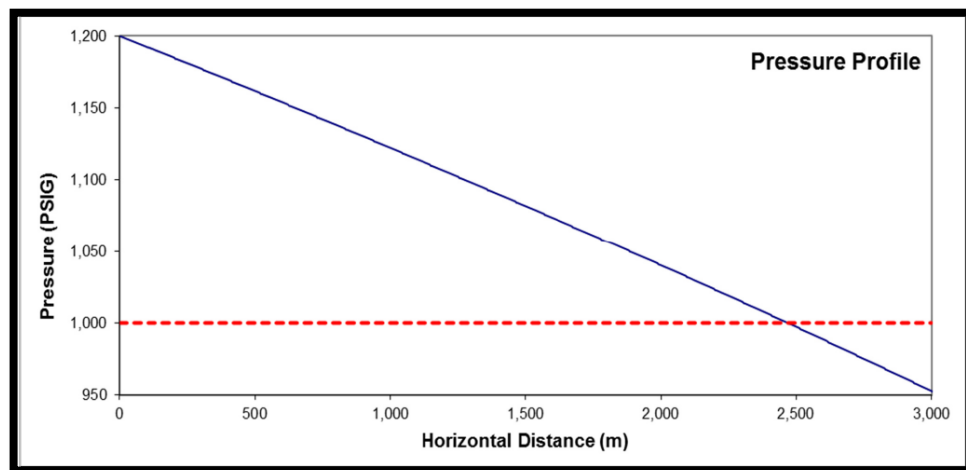


Figura 36. Perfiles de temperatura

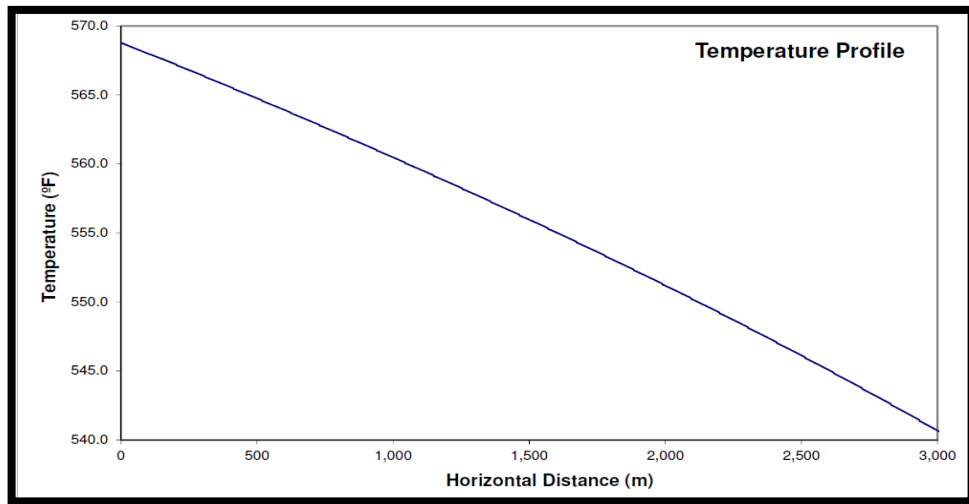
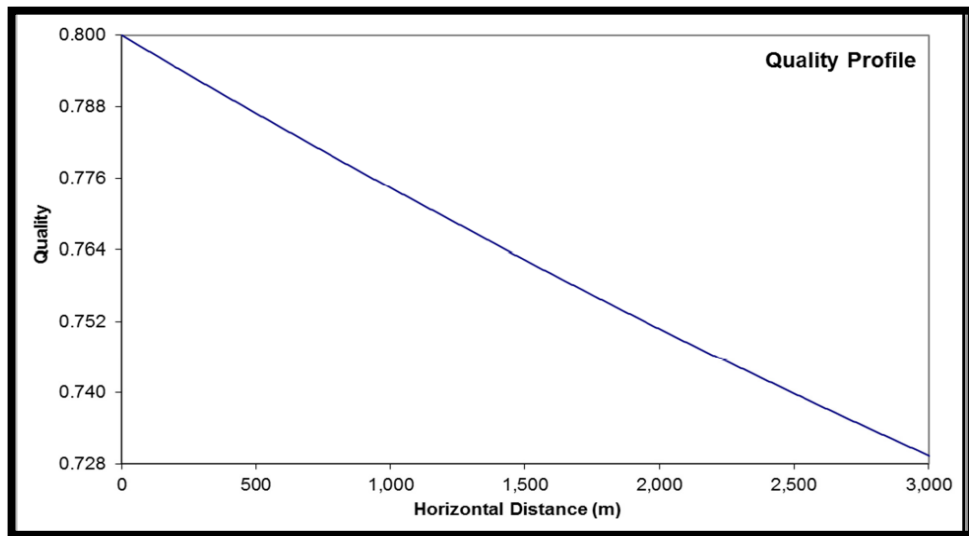
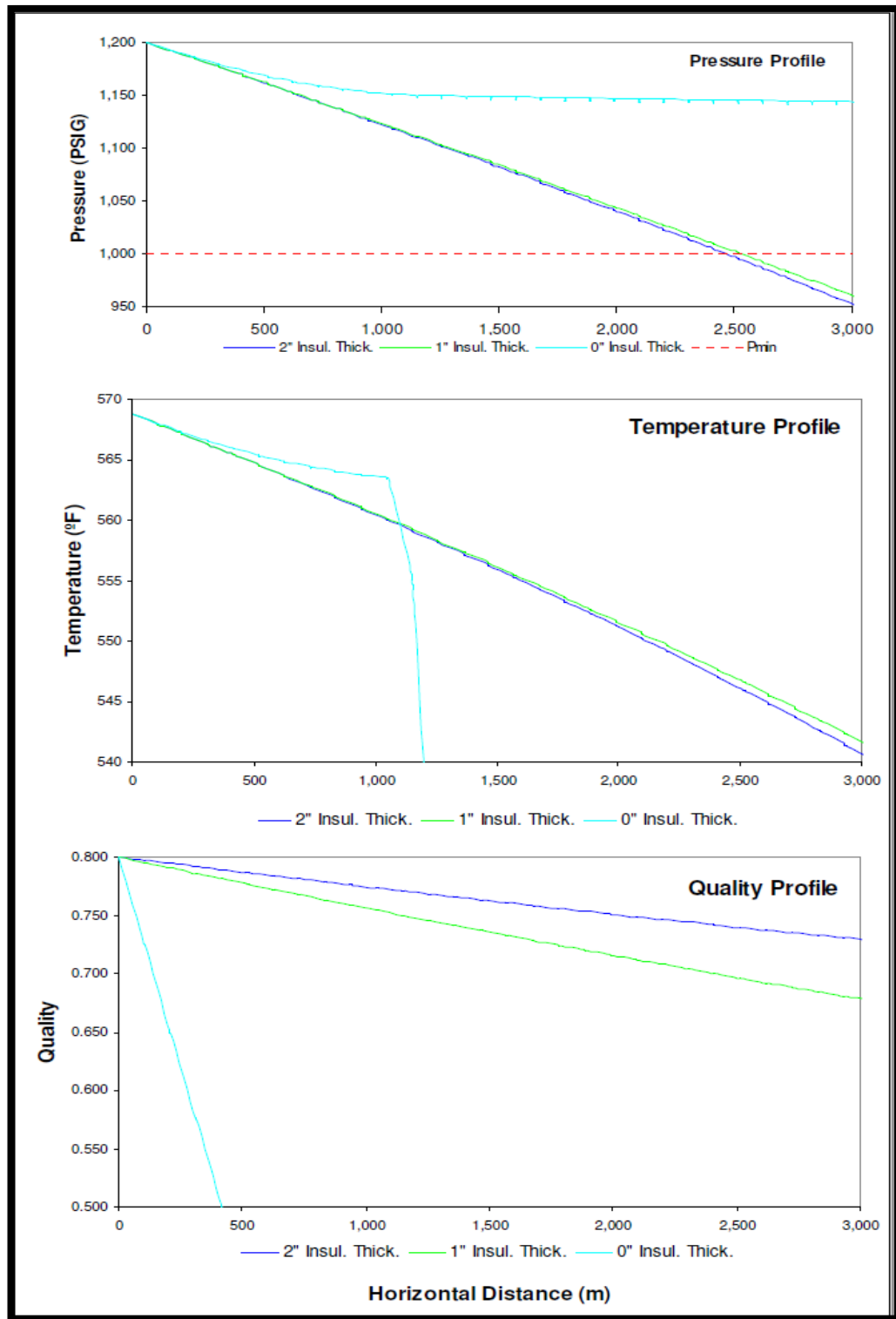


Figura 37. Perfiles de calidad de vapor



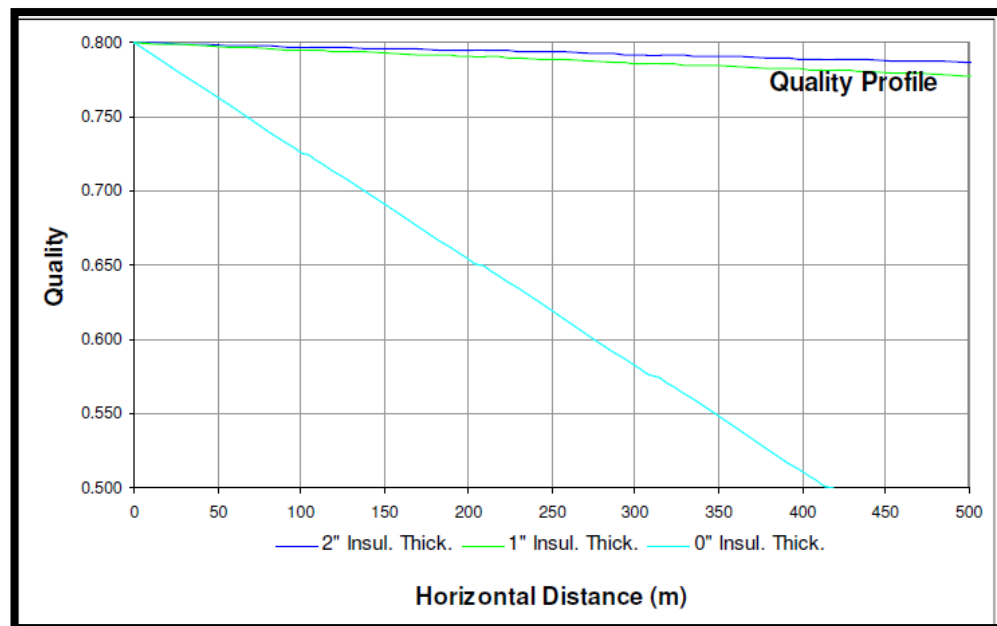
En la siguiente gráfica se describe el comportamiento de presión, temperatura y calidad de vapor respecto al deterioro del aislamiento (0", 1" y 2"),

Figura 38. Influencia del espesor de aislamiento



El espesor de aislamiento muestra una fuerte influencia en la calidad del vapor en las líneas de flujo. En una escala más detallada como se representa en la Figura 5, la ausencia de este ocasiona una disminución importante en la calidad del vapor, al punto que en 50 m de tubería descubierta ya se observa una reducción del cerca del 5% de la calidad inicial. La tendencia de este comportamiento es lineal, y se puede concluir que en un punto cercano a los 420 m ya la calidad ha caído al 50%, lo cual se confirma con los perfiles de temperatura y presión donde a esta distancia comienza a observarse un comportamiento atribuible a una corriente líquida.

Figura 39. Influencia del aislamiento en la calidad del vapor



En la siguiente gráfica se describe el comportamiento de presión, temperatura y calidad de vapor respecto al cambio en la presión de salida del generador,

Figura 40. Tendencia de la presión de operación del generador

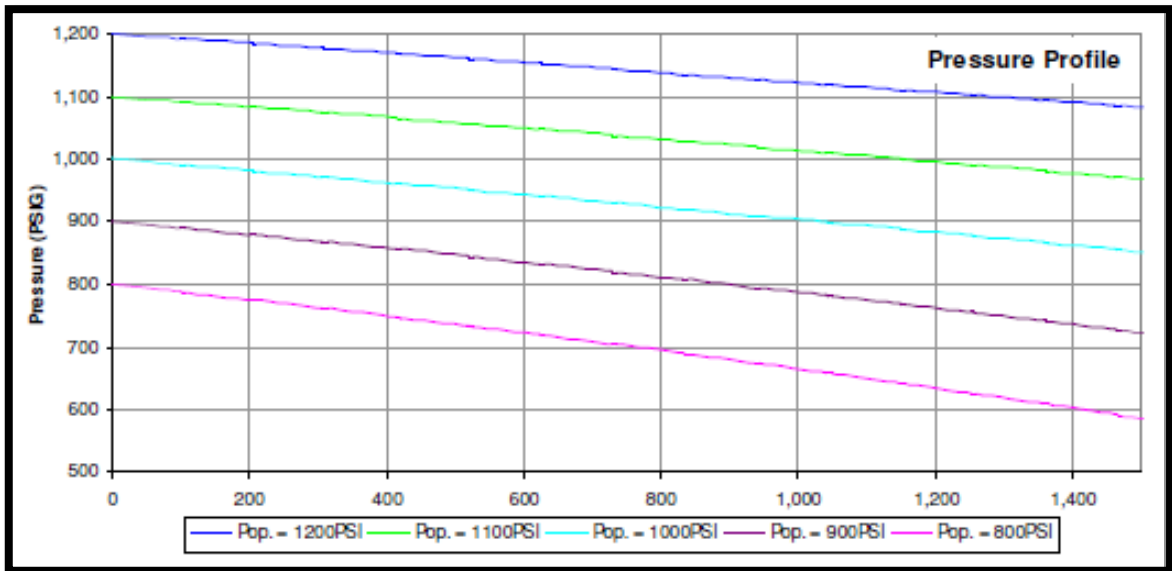


Figura 41. Tendencia de la temperatura con cambios en la presión de operación

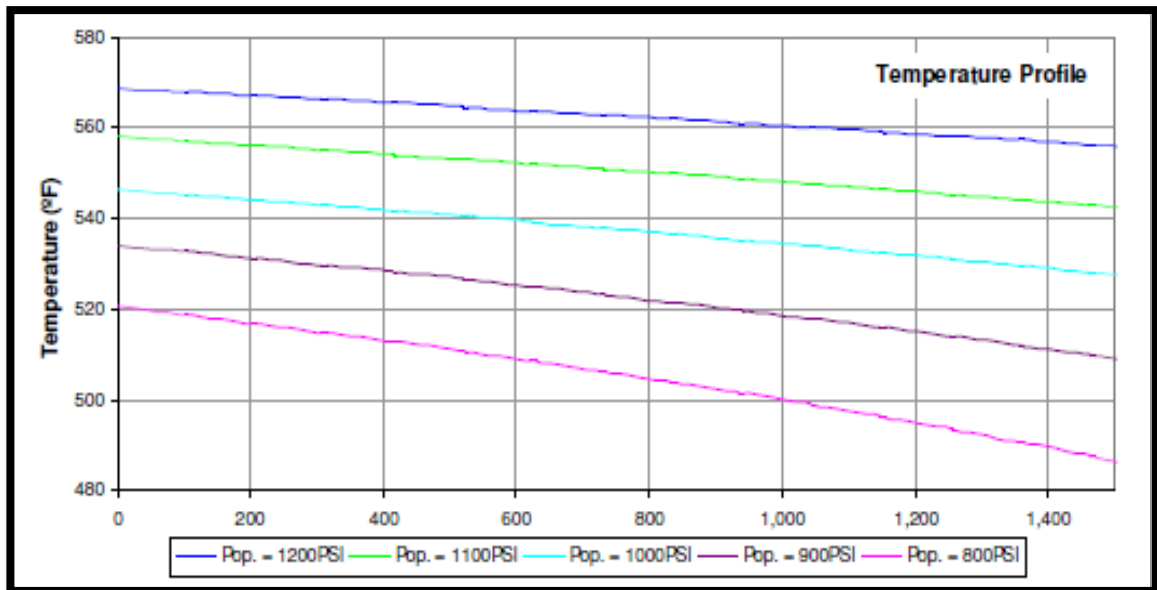
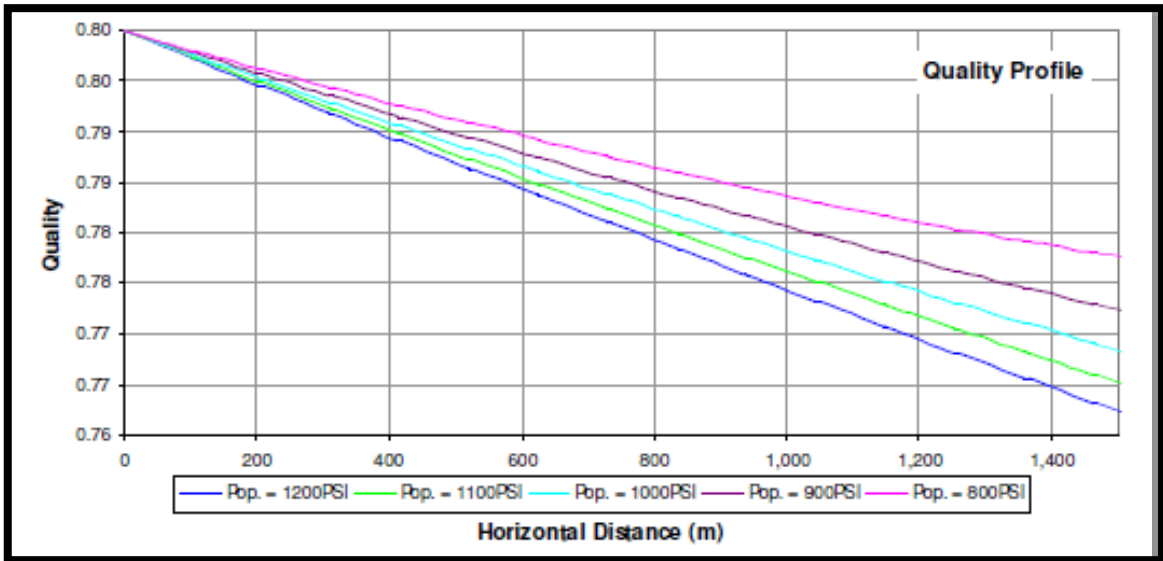


Figura 42. Tendencia de la calidad con cambios en la presión de operación



El comportamiento de la presión y la temperatura se mantienen en sus debidas proporciones. El set de presión de inyección usado corresponderá a un ajuste operacional de las condiciones requeridas por el yacimiento.

La calidad, por otra parte, parece mejorar cuando se trabaja a menos presiones. Esto se debe a que la temperatura del vapor saturado a una calidad del 80% disminuye a medida que disminuye la presión, y por consiguiente, la transferencia de calor hacia el medio es menor. Sin embargo, se debe tener en cuenta que a menor presión, también la energía a transferir va a ser menor en términos de entalpía (BTU/lb).

4. ANALISIS TECNICO ECONOMICO DE LA OPTIMIZACION DE LA CALIDAD DE VAPOR EN POZOS CON METODOS DE ESTIMULACION HUFF & PUFF EN CAMPO JAZMIN

De acuerdo al resultado técnico de la caracterización del agua suavizada en la cual se determinó el estado incrustante que presenta dicha agua, y posteriormente para el tratamiento de este parámetro el resultado técnico de la prueba de sostenimiento de dureza; se debe evaluar si la alternativa viable técnicamente es de igual forma factible económicamente. Para la cual se realizara una evaluación de costo de los productos químicos (Inhibidores de scale), como se muestra a continuación:

Tabla 15. Evaluación económica de los cuatros inhibidores de scale

PRODUCTO	FUNCION	COSTO (USD/Galón)	PRESENTACION (Tambor/ Galones)	COSTO TOTAL (USD/Galón)
X00717	INHIBIDOR DE INCRUSTACION	20	55	1100
X00604	INHIBIDOR DE INCRUSTACION	7	55	385
X00318	INHIBIDOR DE INCRUSTACION	19.97	55	1098.35
X00401	INHIBIDOR DE INCRUSTACION	18.6	55	1023

Evaluando los costos por galón que ofrece cada compañía por el producto ofrecido incluyendo el que se ha aplicado en los últimos cuatro años, se determina el costo total por un tambor de 55 Galones.

Teniendo en cuenta el producto de menor costo que es X0064 el cual también fue viable técnicamente según la prueba de sostenimiento de dureza, se evalúan los costos por galón, de este producto seleccionado junto con el producto que se estaba inyectando como se muestra a continuación:

Tabla 16. Evaluación económica producto actual y producto seleccionado

PRODUCTO	COSTO (USD/Galón)	PRESENTACION (Tambor/ Galones)	COSTO TOTAL (USD/Galón)
X00318 PRODUCTO ACTUAL	19.97	55	1098.35
X00604 PRODUCTO OPTIMO	7	55	385
DIFERENCIA			USD \$ 713.35

Según tarifas por galón de cada producto, es identificable la alta diferencia en costos del producto seleccionado para el control de la incrustación en el agua, teniendo en cuenta que por cada tambor de 55 Galones que se adquiriera la compañía tiene una ganancia de UDS 713 aproximadamente.

Ahora bien si se realiza la evaluación anual para determinar el ahorro por los galones consumidos en la salida de la planta de tratamiento de agua suavizada, se determina lo siguiente:

Tabla 17. Evaluación económica anual de producto seleccionado

PRODUCTO	Galón / Día	Galón/ Mes	Galón/ año	Costo Total Anual USD/Galón
X00318 PRODUCTO ACTUAL	4	120	1440	28756.8
X00604 PRODUCTO OPTIMO	6	180	2160	15120
Diferencia Anual				USD \$ 13636.8

De la anterior relación se puede observar que aunque los galones necesarios con el producto seleccionado aumenten a los galones utilizados actualmente, la

representación en costos al final del año de tratamiento disminuye considerablemente, obteniendo una diferencia de USD\$ 13636 anuales.

Según los costos que representa para la compañía la adquisición de cada uno de los productos, el más favorable técnica y económicamente es el X00604.

En el caso de la segunda prueba, el costo de adquisición de un separador de condensados para instalación en el generador de vapor o en cabeza de pozo:

Tabla 18. Costo de instalación de Separador de Condensados

Cantidad	Unidad	Descripción	Precio Unitario	Monto Total
3	EA	3" ANSI 900#S7 SEPARADOR DE HUMEDAD	\$ 46,944,000	\$ 140,832,000
3	EA	FILTRO FIG 34 H, 3/4" SW WCB T.0.8 mm	\$ 992,000	\$ 2,976,000
3	EA	TRAMPA HP 150 3/4" SW	\$ 4,095,232	\$ 12,285,696
6	EA	VALVULAS ORBIT DE 3"	\$ 3,000,000	\$ 18,000,000
SUB TOTAL				\$ 174,093,696
IVA				\$ 27,854,991
TOTAL				\$ 201,948,687

5. CONCLUSIONES

- La tendencia incrustante que se determinó bajo las pruebas de caracterización del agua suavizada inclinan al tratamiento de las sales disueltas y la alcalinidad que posee con el fin de controlarlas y garantizar agua de alta pureza para la generación de vapor.
- El problema de las incrustaciones es de consideración muy importante, principalmente en la industria, porque las incrustaciones pueden obstruir las tuberías a tal grado que se produzcan explosiones o que se inutilicen las unidades de los procesos industriales, resultando más económico darle a las aguas un tratamiento de ablandamiento, que sustituir tuberías, equipo, etc.
- De acuerdo a la prueba de sostenimiento de dureza, el producto seleccionado para garantizar vida útil y eficiencia en el generador de vapor es el X00604 a una dosis de 20 ppm, ya que mantiene los parámetros iniciales durante el flujo y en las condiciones de operación del generador de vapor.
- En cuanto a la información de la tendencia corrosiva – incrustante del agua, en el análisis se puede determinar que a las condiciones típicas de operación de los generadores, los iones incrustantes del agua están presentes y aunque tienen tendencia a la precipitación, esta es baja y dado ese comportamiento, se puede aumentar la calidad del vapor asegurando la inyección de productos químicos que mantengan los iones incrustantes en solución para evitar que haya una precipitación.
- Según la caracterización y pruebas de dureza, con la calidad del agua actual, no se requiere un tratamiento adicional para eliminación de sales incrustantes, y el agua que se encuentre en estado líquido dentro del equipo contribuye en el arrastre de las sales residuales; y no es necesario eliminar las actuales sales

incrustantes, pues a las condiciones operativas del generador el estudio de tendencia incrustante muestra muy baja precipitación que se mitiga con aplicación de inhibidor de incrustaciones

- El separador entrega una eficiencia de secado alta, pero no se garantiza el 100% de sequedad por el hecho de que el “vapor saturado” siempre estará en proceso de condensación. Los separadores tipo baffle poseen una eficiencia del 95% debido a los cambios de velocidad del vapor. Los fabricantes recomiendan esta clase de separadores de condensado tipo baffle sobre los ciclónicos debido a que su performance se afecta seriamente por cambios de velocidad.
- Partiendo del hecho que la caldera provee un vapor con una calidad del 80% (20% de masa es agua). Y que el separador provee una sequedad alrededor del 95% según fabricante, para una condición de carga de vapor nominal (42743 lb/h) operando a 1200 psig y descargando a 0 psig, se puede observar que el balance de masas entrega una carga de condensado a la salida de la trampa de 3859 lb/h (7.72 gpm).
- No toda la carga de humedad (20%) es retenida por el separador. Según el balance de masa solo 12 gpm son los que llegan antes de la trampa a 1200 psig.
- El condensado antes de la trampa se encuentra a 1200 psig @ 568°F, y descarga a una presión de 0 psig, donde solo puede existir agua -en estado líquido- a 200°F. Este cambio de presión del condensado ocasiona que el 40% de la masa de condensado antes de la trampa se revaporice, dejando únicamente 3859 lb/h (7,7 gpm) en estado líquido.
- En la prueba realizada con el separador en cabeza de pozo se concluye la necesidad de optimizar el sistema instalando válvulas de purga una antes del

separador y una después para verificar visualmente en desalojo de condensado, esto con el fin de verificar más confiablemente la calidad del vapor en este punto.

- De acuerdo a los resultados de la simulación, no es recomendable mantener distancias de inyección mayores a 2000 m, dado que la presión estaría por debajo del objetivo mínimo de inyección. En cuanto a la calidad del vapor, se tiene que por encima de los 2000 m de longitud de tubería se puede presentar calidad por debajo del 75%, lo que es desfavorable para la transferencia de calor.
- La simulación concluye que hay pérdidas de calidad en 3000 m desde el generador hacia el pozo de cerca del 5% con 2" de espesor en el recubrimiento en la tubería de vapor y unas pérdidas de calidad del 10% con un espesor de 1" en el recubrimiento. Las pruebas realizadas con el separador de condensados instalado en cabeza de pozo arrojaron pérdidas de calidad de vapor del 12% en una distancia apróx de 610 m, con estos datos se pueden inferir lo siguiente, el espesor de aislamiento está bastante deteriorado y los tramos sin recubrimientos están afectando seriamente la calidad de vapor en cabeza de pozo y el condensado acumulado en la tubería, el cual no es despreciable teniendo en cuenta la transferencia de calor que se debe realizar en cada entrada de un pozo con un generador en stand by.
- Sí se desea detallar el efecto del aislamiento en las líneas de vapor en Campo Jazmín sobre la calidad de vapor inyectado se recomienda realizar un diagnóstico térmico, el cual es frecuentemente ofrecido por los proveedores de aislamientos.
- Se recomienda instalar puntos de drenaje o purga a lo largo de la tubería de vapor o en dado caso en puntos críticos determinados en un estudio de topografía detallado.

- Del estudio del inhibidor de incrustación seleccionado, cumple técnicamente simulando las condiciones del generador de vapor durante 24 horas sosteniendo el valor de dureza y resultó ser el más conveniente económicamente obteniendo una ganancia a la compañía en costos de USD \$ 13636.8 anuales con base a los costos actuales, por lo cual será evaluado en la planta de tratamiento semanalmente determinando la confiabilidad de la prueba de botella aplicada.

BIBLIOGRAFIA

<http://es.slideshare.net/marconmadariaga/tratamiento-de-agua-para-calderas>

<http://www.bonsaimenorca.com/articulos/articulos-tecnicos/parametros-de-calidad-de-las-aguas-de-riego/#Índices de estabilidad de las Aguas Carbonato-Cálcicas>

<http://www.construsur.com.ar/>

http://www.en-fabinc.com/es/steam_measurement_system.shtml

The steam and condensate Loop. Spirax Sarco, Modulo 12.5 Separators
S7 Spirax Sarco Carbon Steel Separator

<http://www.lennotech.es/calculadoras/langelier/langelier.htm>

<http://www.nordconsultors.es/indice-langelier.html>

<http://www.spiraxsarco.com/es/resources/steam-tables/wet-steam.asp>

Condenser for flash condensate from high pressure source rev1. Pdf. Spirax Sarco

MANUAL OPERATIVO DE GENERACIÓN DE VAPOR MTB CAMPO JAZMÍN, MA-
OPE-023