

Estudio de la Influencia y Correlación entre la Tasa de Variación del Flujo y la Estabilidad de
Variables Operativas en una Planta Joule Thomson de Procesamiento de Gas Natural

Óscar Julián Araque Herrera

Monografía para optar el título de Especialista en Gas

Director

Jabid Eduardo Quiroga Méndez

Doctor en Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Especialización en Gas

Bucaramanga

2022

Contenido

	Pág.
Introducción.....	8
1. Objetivos.....	10
1.1 Objetivo General.....	10
1.2 Objetivos Específicos.....	10
2. Gas Natural.....	11
2.1 Cadena de Valor del Gas Natural.....	11
2.2 Tratamiento del Gas Natural.....	13
2.3 Procesamiento del Gas Natural.....	15
2.4 Actualidad del Gas Natural en Colombia.....	16
3. Joule Thomson.....	19
3.1 Efecto Joule Thomson.....	19
3.2 Planta Joule Thomson.....	22
3.2.1 Generalidades.....	22
3.2.2 Caracterización.....	25
3.2.2.1 Proceso Principal.....	25
3.2.2.2 Sistemas Auxiliares.....	27
3.2.2.3 Sistemas Industriales.....	27
4. Planta de Estudio.....	28
4.1 Flujo a través de una Planta JT.....	28

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA Y CORRELACIÓN	3
4.2 Variación del Flujo en una Planta JT	32
5. Resultados y Análisis de Resultados	39
6. Conclusiones	40
7. Recomendaciones.....	41
Referencias Bibliográficas.....	42

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Cadena de Valor del Gas Natural</i>	12
Figura 2. <i>Tratamiento y Procesamiento del Gas Natural</i>	16
Figura 3. <i>Experimento Joule Thompson</i>	19
Figura 4. <i>Expansión Adiabática en Válvula de Estrangulamiento</i>	20
Figura 5. <i>Curva de Inversión</i>	21
Figura 6. <i>Planta Joule Thomson</i>	23
Figura 7. <i>Planta JT de Estudio</i>	28
Figura 8. <i>Lazo de Control Cerrado con Retroalimentación</i>	29
Figura 9. <i>Tendencia con Porcentaje de Apertura Válvula JT invariable</i>	30
Figura 10. <i>Variables Válvula JT</i>	31
Figura 11. <i>Porcentaje de Apertura Válvula JT y Caudal</i>	32
Figura 12. <i>Aumento de Flujo Válvula JT</i>	33
Figura 13. <i>Respuesta al Aumento de Flujo</i>	34
Figura 14. <i>Respuesta a la Disminución del Flujo</i>	35
Figura 15. <i>Respuesta Válvula Control de Nivel del Separador de Entrada</i>	36
Figura 16. <i>Aumento no Controlado de Carga</i>	37
Figura 17. <i>Aumento de Carga Controlado con Apertura de Choke</i>	39

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Impurezas Asociadas del Gas Natural</i>	13
Tabla 2. <i>Efectos Fisiológicos del Sulfuro de Hidrógeno en el Aire</i>	14
Tabla 3. <i>Especificaciones de Calidad del Gas Natural</i>	18

Resumen

Título: Estudio de la influencia y correlación entre la tasa de variación del flujo y la estabilidad de variables operativas en una planta Joule Thomson de procesamiento de gas natural*

Autor: Óscar Julián Araque Herrera**

Palabras Claves: Gas Natural, Procesamiento, Joule Thomson, LGN, Flujo, Estabilidad.

Descripción:

El procesamiento es la etapa de la cadena de valor donde se obtienen los líquidos del gas natural, agregando valor en el mercado de los hidrocarburos y garantizando una calidad del gas a ventas con las especificaciones normativas. El efecto Joule Thomson es una alternativa de procesamiento sencilla, económica y flexible a la operación.

En el desarrollo de este trabajo se presentó y se caracterizó una planta Joule Thompson, consolidando todas las áreas relacionadas con el proceso y su importancia en el vínculo con los productos finales: Gas a ventas en condiciones del Reglamento Único de Transporte, condensados estabilizados a condiciones atmosféricas y agua de producción tratada para disposición final.

Se estudió y analizó la variación del flujo, relacionando las variables afectadas con la totalidad de áreas de la planta determinando la criticidad de la velocidad en un cambio de caudal y su efecto inmediato en variables directas y posteriormente en la totalidad de variables, áreas y/o sistemas.

Se presentaron tendencias de la operación de un campo colombiano para soportar el estudio y resaltar la importancia de la tasa de variación del flujo en la estabilidad del proceso.

El análisis realizado sobre la planta estudio, concluyó con unos parámetros de operaciones y recomendaciones para no afectar producción, equipos y yacimientos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Jabid Eduardo Quiroga Méndez, Doctor en Ingeniería Civil

Abstract

Title: Study of the influence and correlation between the flow variation rate and the stability of operating variables in a Joule Thomson natural gas processing plant*

Author: Óscar Julián Araque Herrera**

Keywords: Natural gas, processing, Joule Thomson, NGL, flow, stability.

Description: Processing is the stage of the value chain where natural gas liquids are obtained, adding value to the hydrocarbons market and guaranteeing gas quality for sales with regulatory specifications. The Joule Thomson effect is a simple, inexpensive and flexible processing alternative to operation.

In the development of this work, a Joule Thompson plant was presented and characterized.

Consolidating all the areas related to the process and its importance in the linkage with the final products: Gas for sales under the Single Transport Regulation, condensates stabilized at atmospheric conditions and treated production water for final disposal.

The variation of the flow was studied and analyzed, relating the affected variables with all the areas of the plant determining the criticality of the speed in a flow change and its immediate effect on direct variables and later on all variables, areas and/or systems.

Tendencies of the operation of a Colombian field were presented to support the study and to highlight the importance of the rate of variation of the flow in the stability of the process.

The analysis carried out on the study plant concluded with some operating parameters and recommendations so as not to affect production, integrity of equipment hydrocarbons and reservoirs.

* Degree work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Director: Jabid Eduardo Quiroga Méndez, Doctor in Civil Engineering

Introducción

Las plantas de producción de Gas Natural en Colombia resultan de fundamental importancia para el soporte energético del país.

Un balance demanda-oferta diario, determina la cantidad del aporte que debe suplir cada uno de los actores involucrados en la oferta mediante un dato oficial de nominación. Cuando este valor varía significativamente, el área de operaciones de las plantas de producción de gas se enfrenta a la necesidad de realizar ajustes rápidos en los valores de las variables más significativas.

Consecuencia de ello la manipulación de las condiciones en la operación, lo cual puede provocar inestabilidad del proceso debido a variaciones drásticas del flujo en un intervalo de tiempo determinado. La velocidad con la cual se realizan dichos ajustes repercute altamente en los valores de presiones, niveles y temperaturas manejados en las distintas áreas. Reflejándose en la estabilidad de cada área del proceso, como en la totalidad de la planta.

Por lo cual, es de vital importancia el estudio de las variables en las zonas de alta y baja presión de una planta Joule Thomson y las posibles consecuencias a las que conlleva dicha variación de caudal.

Entendiendo la importancia de la continua estabilidad operacional, con el trabajo expuesto a continuación se desarrolló el estudio que permita comprender la afectación en las distintas áreas del proceso cuando surge la necesidad inmediata de variar tanto el flujo de ventas, consecuencia de la variación de la carga en la entrada de una planta Joule Thomson.

En el capítulo inicial encontramos de manera compacta un segmento de la teoría relacionada con el gas natural, y se aterriza este combustible a la actualidad colombiana. En el siguiente capítulo, se proporciona un contexto científico e ingenieril del efecto Joule Thomson y

su relación con las plantas de procesamiento, caracterizando de manera general sus sistemas y áreas.

En el capítulo final se estudia el flujo a través de dicha planta, la variación y la tasa de variación de este. Igualmente, las variables que se afectan y la importancia de cada una con respecto a la estabilidad del proceso.

Se concluye con parámetros operacionales, resultado del estudio realizado.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Conocer mediante un análisis documental, cómo la velocidad de aumento del flujo, influye en el estudio de la estabilidad de las variables del proceso de una planta Joule Thomson.

1.2 Objetivos Específicos

Definir las variables de proceso inmediatamente afectadas debido a una variación de caudal a través de una planta Joule Thomson.

Describir cómo se altera la estabilidad del proceso en función de la velocidad de cambio de los valores de las variables significativas.

Determinar las consecuencias que genera un cambio no controlado en el flujo.

2. Gas Natural

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos (compuesto orgánico cuyos componentes son solamente el hidrógeno y el carbono) parafínicos livianos, de la serie homóloga designada alcanos descritos con la fórmula C_nH_{2n+2} . Compuesto principalmente por metano en mayor proporción, etano, propano, isobutano, n-butano, isopentano, n-butano e hidrocarburos más pesados en baja concentración.

En ocasiones, con presencia de contaminantes tales como dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, agua y algunos compuestos químicos presentes en menores cantidades.

Los cuatro primeros alcanos son gases a presión y temperatura normal. A su vez, el propano y butano pueden ser extraídos del gas y licuados para su transporte y almacenamiento, gracias a la disminución de la volatilidad con el incremento del número de átomos de carbono. Hidrocarburos intermedios como C5+ se encuentran como líquidos volátiles a condiciones atmosféricas, obteniendo productos tales como pentano plus, condensados, gasolina natural y líquidos de gas natural.

2.1 Cadena de Valor del Gas Natural

El gas natural es un combustible fósil encontrada en los yacimientos de hidrocarburos ya sea disuelta en el petróleo en fase gaseosa a ciertas condiciones de presión y temperatura, pero sin las condiciones, características y propiedades adecuadas para poder ser aprovechado por la industria a favor de la humanidad.

La cadena de valor comienza con la producción, extracción y recolección, para sustraer el hidrocarburo desde el yacimiento hasta las facilidades de superficie de forma segura debido a las altas presiones manejadas.

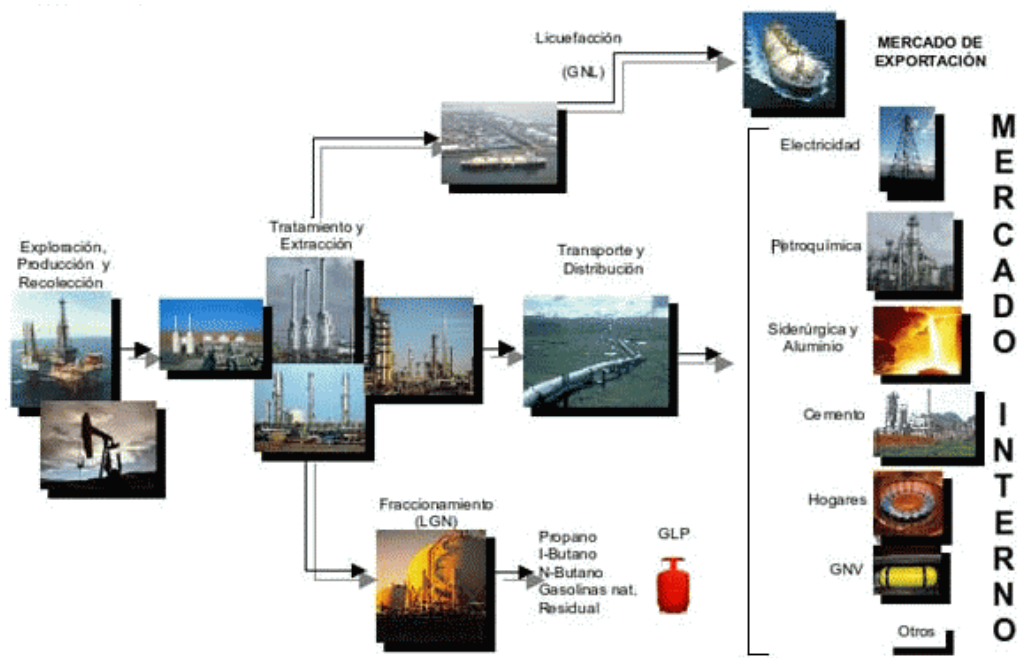
Con el fluido recombinado en superficie, se procede al tratamiento y procesamiento, con el fin de retirar impurezas y separar distintos subproductos con valor agregado y mayor rendimiento para un adecuado aprovechamiento de la energía.

Ya con las especificaciones adecuadas, se transporta mediante gasoductos desde las zonas apartadas donde se encuentran los yacimientos hacia los centros poblacionales o zonas industriales para ser distribuidos a los distintos actores del mercado.

Aportando así a la producción de la gran mayoría de los sectores industriales y la calidad de vida de las familias.

Figura 1.

Cadena de Valor del Gas Natural



Nota: Enegas. (sf). Cadena de Valor. <http://www.enagas.gob.ve/info/gasnatural/cadenavalor.php>

2.2 Tratamiento del Gas Natural

El gas natural al llegar a las facilidades de superficie, viene asociado con componentes contaminantes los cuales poseen propiedades indeseables que no permiten el cumplimiento de las especificaciones necesarias para el procesamiento y venta. El objetivo de una planta de procesamiento es vender gas, haciendo necesario el retiro de las impurezas mediante la deshidratación y el endulzamiento.

Tabla 1.

Impurezas Asociadas del Gas Natural

Agua (H_2O)	Mercaptanos (RSH)
Dióxido de Carbono (CO_2)	Sulfuros de Carbonilo (COS)
Sulfuro de Hidrógeno (H_2S)	Monóxido de Carbono (CO)
Nitrógeno (N_2)	Disulfuro de Carbono (CS_2)
Oxígeno (O_2)	Mercurio (Hg)

La deshidratación es el proceso de remoción del vapor de agua asociados el gas, que es la impureza más común en el gas natural. Dicho proceso es necesario para evitar problemas operacionales como formación de hidratos y obstrucciones, corrosión de líneas y equipos y problemas en los compresores. Simultáneamente se evitan problemas en calidad como la afectación del poder calorífico y la alta humedad. Para deshidratar se han desarrollado distintas alternativas tales como adsorción, absorción, deliquesencia, expansión-refrigeración y permeación del gas.

Además del vapor de agua, resulta necesario remover o ajustar el contenido de contaminantes ácidos asociados a la corriente de fluido recombinado proveniente de los pozos para que sea aceptado por el comprador. Las impurezas más comunes son el dióxido de carbono CO_2 y el sulfuro de hidrógeno H_2S ; el CO_2 combinado con agua produce ácido carbónico, mientras el

H_2S y el agua genera ácido sulfúrico débil por lo cual son considerados gases ácidos. Estos, son generadores por excelencia de corrosión y afectan el poder calorífico del gas lo cual repercute en la venta del gas. Igualmente, el H_2S es altamente nocivo para la salud aún en pequeñas cantidades y puede repercutir en daños fisiológicos irreparables.

Tabla 2.

Efectos Fisiológicos del Sulfuro de Hidrógeno en el Aire

Concentración en Aire (Porcentaje por Vol.)	Concentración en Aire (ppm)	Efectos Fisiológicos
0,00013	0,13	Olor perceptible y desagradable.
0,001	10	Concentración máxima permitida por la OSHA para 8 horas de exposición.
0,001	100	Dolor de cabeza, tos, irritación de ojos, respiración alterada, e irritación de garganta. Pérdida del sentido del olfato después de 3 a 15 minutos de exposición.
0,05	500	Vértigo, pérdida de equilibrio y del conocimiento. Paro respiratorio después de 30 a 45 minutos de exposición.
0,07	700	Rápida inconsciencia. Paro respiratorio y muerte en pocos minutos.
0,10 +	1000 +	Daño permanente del cerebro o muerte a menos que se rescate rápidamente y se brinde resurrección artificial.

Nota: Arnold, K.Y; Stewart. M. (1999). Surface productions operations. Design of gas-handling system and facilities. Vol. 2. Ed. 2. Houston, Texas. United States. Gulf publishing company. p 152. ISBN. 0-88415-822-5. Tomada del libro Diseño y Operación de Plantas de Tratamiento de Gas, Nicolas Santos Santos, M. Sc.

Entre los métodos comúnmente utilizados para endulzamientos se encuentran: absorción a través de solventes químicos, físicos y mixtos, endulzamiento a través de lechos sólidos, conversión directa, secuestrantes químicos, utilización de membranas y destilación extractiva.

2.3 Procesamiento del Gas Natural

Posteriormente al ser eliminadas o controladas las impurezas dentro de los rangos establecidos por las normas, la corriente recombina de la mezcla de distintos hidrocarburos es sometida a distintos procesos con el fin de obtener subproductos que posean un mayor comercial como una fuente de ingreso adicional, ya sean puros como el propano, butano, pentano o hidrocarburos más pesados, o mezcla de propano y butano conocida como GLP (Gas licuado del Petróleo).

El recobro de líquidos se da en el contexto del denominado *shrinkage value*, recalando la diferencia en el beneficio económico al vender los productos hidrocarburos en su fase líquida o como combustible gaseoso.

Igualmente, con o sin incentivo económico, el gas debe ser procesado para acondicionar su punto de rocío de hidrocarburos o *Cricondenterma* y el poder calorífico para cumplir la norma ajustándose a especificaciones de calidad y seguridad en la entrega al transportador.

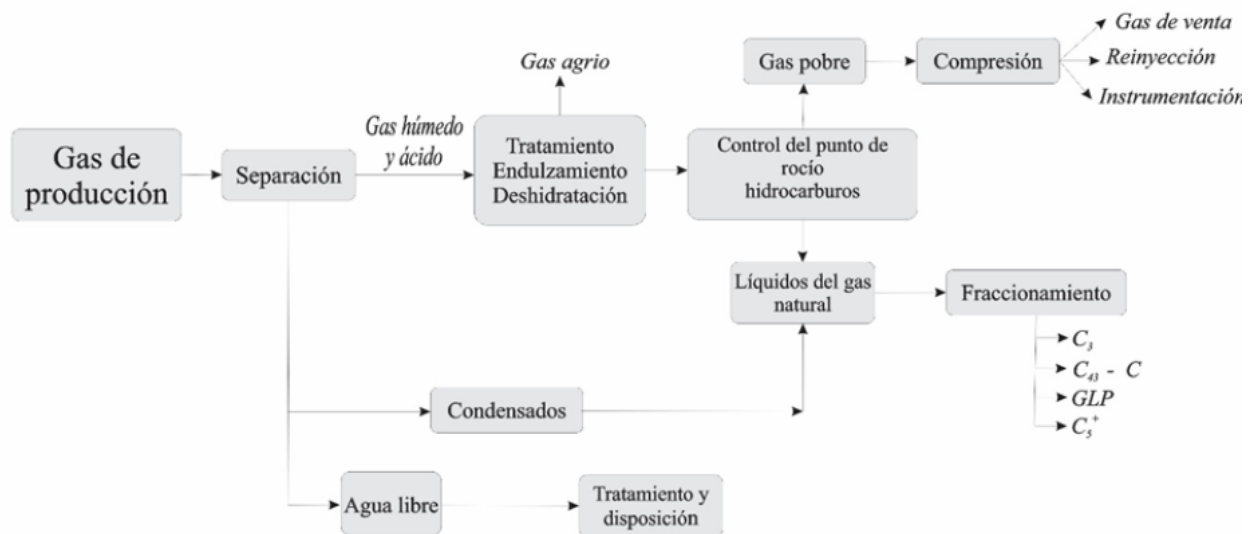
Generalmente por norma el poder calorífico debe estar en valores aproximados a los 1000 BTU/scf, esta condición se logra únicamente con el metano CH_4 que posee un poder calorífico de 1010 BTU/scf, el etano C_2H_6 con 1770 BTU/scf ya se sale de la norma.

Las alternativas comúnmente utilizadas para el recobro de líquidos de gas natural obedecen al enfriamiento regido por principios termodinámicos. Ya sea, refrigeración mecánica que obedece a un proceso isobárico, enfriamiento adiabático causado por una expansión isoentálpica (efecto Joule Thomson o procesos turboexpander isoentrópicos). Igualmente se encuentran plantas de absorción con aceite pobre, adsorción con lecho sólido y procesos de separación con membranas.

La tecnología más reciente para el recobro de hidrocarburo líquido es la separación supersónica en una tobera convergente-divergente conocida como tubo twister. Tecnología que aún no está madura en territorio colombiano.

Figura 2.

Tratamiento y Procesamiento del Gas Natural



Nota: Ribón, Helena Margarita. (2018). Módulo propiedades de los hidrocarburos.

2.4 Actualidad del Gas Natural en Colombia

La demanda energética del país y las preocupaciones ambientales han llevado al gas natural a ser por excelencia la energía de transición hacia las energías renovables en el país gracias a sus bondades tanto de costo como en equilibrio ambiental-energético. Dicha transición se calcula alrededor de los 30 años y con la demanda en aumento, las reservas de los yacimientos colombianos cada vez nos presentan una fecha más cercana a la necesidad de importación. Por esto, se han venido impulsando alternativas necesarias para poder aumentar esta cifra de reservas.

La producción comercializada de gas en Colombia fue de 1.128,74 millones de pies cúbicos por día (MPCD) durante diciembre de 2021, lo que representó un aumento del 2,49 % en

comparación con noviembre del mismo año (1.101,27 MPCD). En comparación con diciembre del 2020 (1.107,84 MCPD), la producción aumentó 1,89%.

Según información reportada por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), el incremento de la producción de gas durante el último mes del año pasado se explica por una mayor comercialización en los campos Gibraltar (Toledo-Norte de Santander), Cupiagua (Aguazul-Casanare), Clarinete (La Unión/Sahagún-Córdoba/Sucre), Recetor West (Aguazul-Casanare) y La Belleza (Plato-Magdalena), debido al restablecimiento de la producción y al comportamiento de la demanda de gas durante el mes.

Al mirar el consolidado de 2021 se evidencia que la producción promedio de gas de Colombia fue de 1.087 MPCD, la mayor cifra registrada en los últimos cinco años.

En Colombia, la CREG Comisión Reguladora de Energía y Gas, adscrita al Ministerio de Minas y Energía, es la encargada de trabajar conjunto a todos los actores en las normas que rigen la calidad del Gas Natural.

Mediante la resolución CREG 071 de 1999 se adoptó el Reglamento Único de Transporte de Gas Natural - RUT, en el cual se establecen las especificaciones de calidad del gas natural en el punto de entrada del sistema de transporte así:

Tabla 3.*Especificaciones de Calidad del Gas Natural*

Especificaciones	Sistema Internacional	Sistema Inglés
Máximo poder calorífico bruto (GHV) (Nota 1)	42.8 MJ/m ³	1.150 BTU/ft ³
Mínimo poder calorífico bruto (GHV) (Nota 1)	35.4 MJ/m ³	950 BTU/ft ³
Contenido de Líquido (Nota 2)	Libre de líquidos	Libre de líquidos
Contenido total de H ₂ S máximo	6 mg/m ³	0.25 grano/100PCS
Contenido total de azufre máximo	23 mg/m ³	1.0 grano/100PCS
Contenido CO ₂ , máximo en % volumen	2%	2%
Contenido de N ₂ , máximo en % volumen	5%	5%
Contenido de inertes máximo en % volumen (Nota 3)	5%	5%
Contenido de oxígeno máximo en % volumen	0.1%	0.1%
Contenido máximo de vapor de agua	97 mg/m ³	6.0 Lb/MPCS
Temperatura de entrega máximo	49°C	120°F
Temperatura de entrega mínimo	7.2°C	45°F
Contenido máximo de polvos y material en suspensión (Nota 4)	1.6 mg/m ³	0.7 grano/1000 pc
Número de Wobbe (Nota 5)	Entre 46.6 MJ/m ³ y 52,7 MJ/m ³	Entre 1250.0 BTU/ft ³ y 1414,7 BTU/ft ³

Nota: 1. Todos los datos sobre metro cúbico o pie cúbico de gas están referidos a Condiciones Estándar. 2. Los líquidos pueden ser: hidrocarburos líquidos, agua y otros contaminantes en estado líquido. 3Se considera como contenido de inertes la suma de los contenidos de CO₂ y nitrógeno. El oxígeno se considera como un contaminante. 4. El máximo tamaño de las partículas debe ser 15 micrones. 5. Calculado con el poder calorífico superior en base volumétrica a condiciones estándar. Tomado de referencia electrónica <https://www.grupovanti.com/>

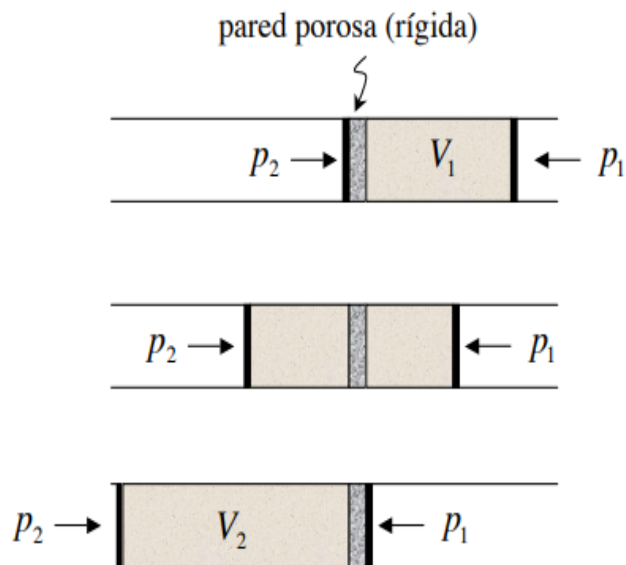
3. Joule Thomson

3.1 Efecto Joule Thomson

Iniciando la quinta década del siglo XVII, James Joule y William Thomson (Lord Kelvin) descubrieron una ingeniosa manera para disminuir la temperatura de un gas (no necesariamente ideal). En el desarrollo de la misma, un volumen 1 de fluido a una presión 1, se deja fluir a través de una pared porosa (barrera adiabática, rígida e impermeable), tal que, al atravesarla, la presión sea reducida a $p_2 < p_1$, y una vez que todo el gas atravesó la pared su volumen es $V_2 > V_1$. La suposición o idealización importante es que todo el sistema se encuentra térmicamente aislado del exterior.

Figura 3.

Experimento Joule Thomson



Este fenómeno, se conoció como expansión adiabática Joule Thomson. Además, se evidenció que la temperatura en el estado dos podía disminuir, aumentar o permanecer invariable. Esto, depende principalmente de tres factores: la composición del gas natural, los valores en el

estado inicial de presión y temperatura y la caída de presión experimentada por el gas. El cambio de temperatura, durante el proceso de expansión es lo que se define como efecto Joule Thomson.

El proceso de expansión Joule Thomson, o estrangulamiento, resulta en un proceso donde la entalpía permanece constante debido a la nula transferencia de calor y a la ausencia de trabajo mecánico alguno.

Figura 4.

Expansión Adiabática en Válvula de Estrangulamiento



De la primera ley de la termodinámica:

$$U_2 - U_1 = Q - W$$

Asumimos que la válvula de estrangulamiento está aislada por lo que no existe transferencia de calor entre el sistema y sus alrededores. Igualmente, el único trabajo presente es el que realiza el gas (sistema) para con sus alrededores debido a que se expande. Tendríamos:

$$W = P_1V_1 - P_2V_2$$

Así

$$U_2 + P_2V_2 = U_1 + P_1V_1$$

$$H_2 = H_1$$

Es de interés para la ciencia y la ingeniería entonces conocer el valor final de temperatura. Análisis termodinámicos y matemáticos concluyen que el comportamiento de dicha variación de temperatura responde a la ecuación:

$$\Delta T = \frac{T \left(\frac{\delta V}{\delta T} \right)_P - V}{C_p} \Delta P$$

Donde C_p corresponde a la capacidad calorífica, relacionada con la capacidad requerida para vencer la atracción molecular.

De la relación anterior se define el *coeficiente de Joule – Thomson “ μ ”*.

$$\mu = \left(\frac{\delta T}{\delta P} \right)_h$$

Este coeficiente describe la variación de la temperatura con respecto a la caída de presión cuando la entalpía de los estados e inicial permanece invariable. Definiendo así:

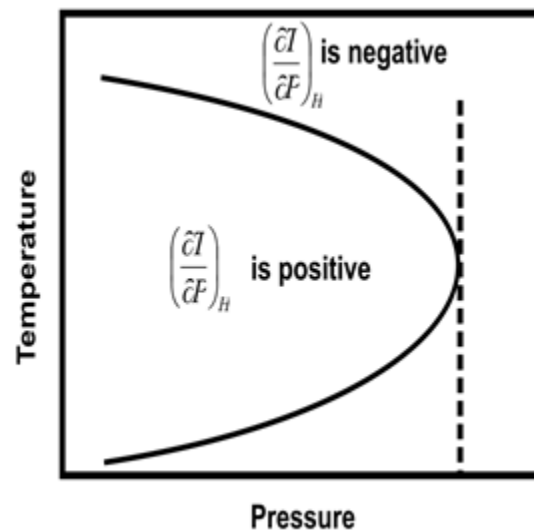
$\mu > 0$ Enfriamiento

$\mu < 0$ Calentamiento

$\mu = 0$ Proceso isotérmico.

Figura 5.

Curva de Inversión



Nota: Campbell, J. (2003). Technical Assistance Service for the Design, Operation and Maintenance of Gas Plants, John Campbell and Company, Capítulo 11. Modificada.

3.2 Planta Joule Thomson

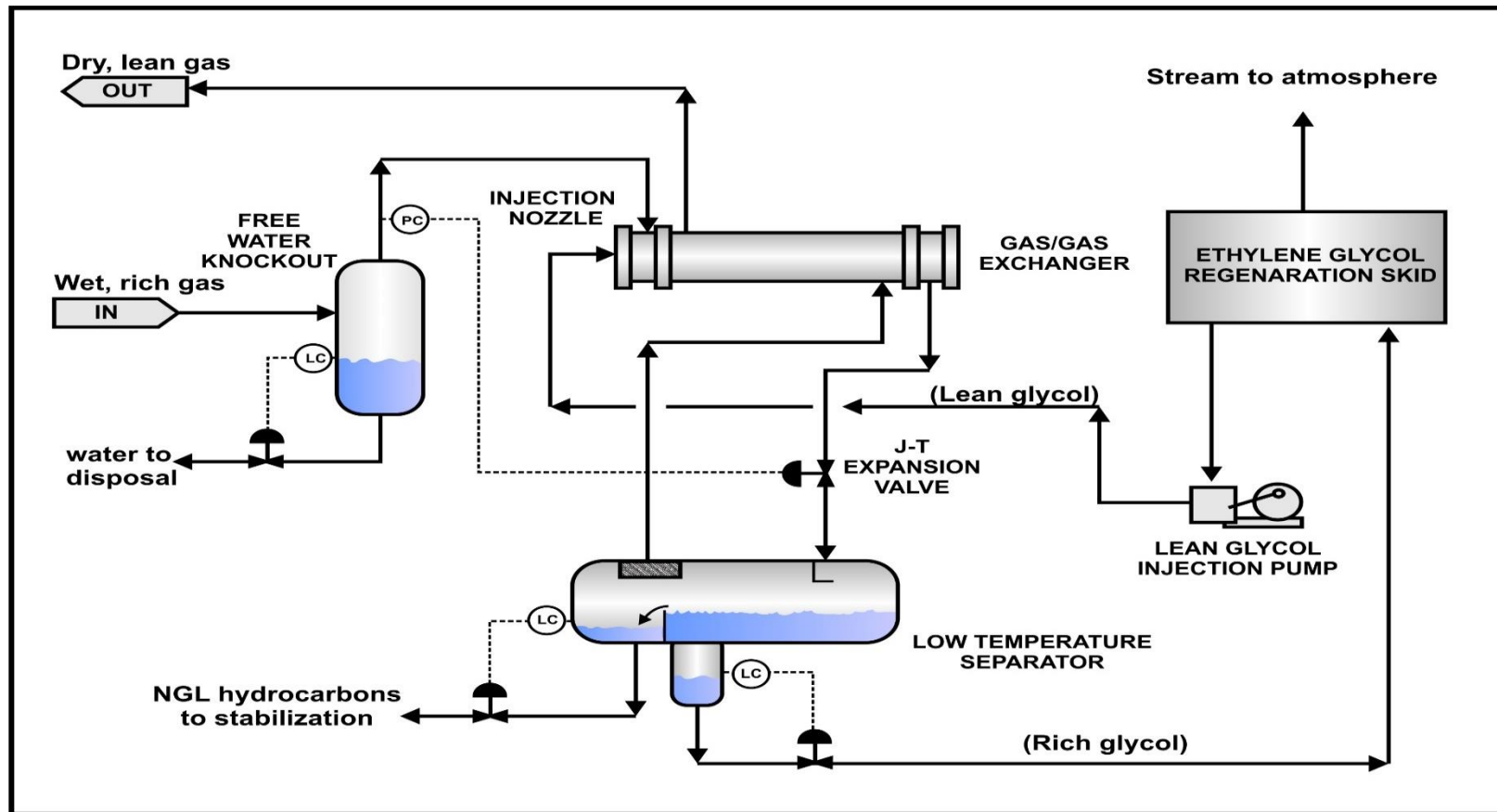
3.2.1 Generalidades

Cuando las condiciones del efecto Joule Thomson generan un enfriamiento (como en el caso de los fluidos hidrocarburos), se genera condensación (recobro de líquidos) reflejada en un aumento de la rentabilidad, generando un valor adicional al mismo tiempo que se encuentra el acondicionamiento de la calidad del gas a las especificaciones normativas.

Los procesos que utilizan este enfriamiento producido por la expansión de un gas como resultado de un proceso isoentálpico son conocidos como procesos de separación o extracción a baja temperatura o Plantas Joule-Thomson debido al principio termodinámico que las rige.

Figura 6.

Planta Joule Thomson



Nota: Campbell, J. (2003). Technical Assistance Service for the Design, Operation and Maintenance of Gas Plants, John Campbell and Company, Capítulo 11. Modificada. Tomada del libro Diseño y Operación de Plantas de Tratamiento de Gas, Nicolas Santos Santos, M.Sc.

La figura 6, muestra el esquema general de una planta Joule Thomson para procesamiento de gas natural. Como se aprecia, la corriente de entrada es rica y húmeda. Por ello, llega a un separador inicial donde el agua libre es removida de dicha corriente. Siguiendo su curso, comienza el enfriamiento de la corriente de alimentación vía a un intercambiador de calor gas-gas donde realiza transferencia en contracorriente con el gas ya procesado que a su vez se calienta para ir a al área de ventas. Es de vital importancia en este pre enfriamiento tener conocimiento de la composición de la corriente y los valores de temperatura alcanzados para evitar la formación de hidratos; de ser necesario se debe inyectar inhibidores.

Ya con la corriente preenfriada, ocurre el enfriamiento isoentálpico, debido a la expansión adiabática generada por la estrangulación a través de la válvula, Es allí donde da lugar al efecto Joule Thomson y se genera el recobro de líquidos e igualmente el acondicionamiento del punto de rocío de hidrocarburo para por cumplir con el Reglamento Único de Transporte y poder ser vendido.

Aguas debajo de la válvula, el flujo recombinado llega a un separador de baja temperatura, donde por separación física tendremos tres corrientes resultantes: Gas seco y pobre vía intercambiador de calor gas-gas donde ganará temperatura gracias a la corriente de gas de alimentación y además de preenfriar dicha corriente garantizar los 45 °F de temperatura mínima de entrega establecida en el RUT, líquidos del gas natural que irán a estabilización y/o fraccionamiento y glicol rico para regeneración.

Estas plantas resultan bastante sencillas de operar y brindan gran flexibilidad en los valores de las variables sin afectar drásticamente la calidad del gas a venta. Sin embargo, es de vital importancia en la operación, realizar ajustes graduales y controlados mediante los cuales no se vea

afectada la estabilidad operacional que puedan producir efectos adversos en: productividad, integridad de equipos y ductos como repercusiones en el yacimiento.

Dichas plantas solo resultan viables donde se tengan suficientes y certeros datos del yacimiento, ya que si este depleta, es indispensable un tren de compresión a la entrada de la misma para garantizar el diferencial de presión necesario. Igualmente, solo es factible su instalación donde la cabeza de pozo este alrededor de 400 psia por encima de la presión a ventas.

3.2.2 Caracterización

Para que una planta Joule Thomson pueda operar y cumplir con objetivo de vender gas natural bajo condiciones RUT, complementario al proceso principal, deben existir sistemas auxiliares e industriales respalden y brinden confiabilidad a una operación continua y segura.

3.2.2.1 Proceso Principal. Encontramos todas las áreas relacionadas con el valor agregado resultante del procesamiento del gas natural, desde la corriente proveniente de los pozos, hasta el gas a ventas e igualmente los productos resultantes del recobro de líquidos.

➤ Área de cabeza de pozos y manifold de producción es aquí donde encontramos la plataforma con los árboles de navidad, cada uno con su respectiva válvula de subsuelo SSSDV, válvula master MSDV, válvula win WSDV y choque HCV. Con el choque se controla la presión en el manifold de producción que es donde concurren todas las líneas provenientes de los yacimientos y la presión de entrada a la planta en caso de no existir una válvula de contrapresión de control para la entrada a la planta.

➤ Área de separación primaria ocurre la primera separación del fluido recombinado proveniente de los yacimientos. Se separan las corrientes de gas, condensados y agua libre proveniente de los pozos.

➤ Área de enfriamiento del gas mediante refrigeración mecánica (proceso isobárico), se comienza a bajar la temperatura de la corriente de gas de entrada con el fin de llegar con una temperatura conveniente a la entrada de la válvula de estrangulación y favorecer el recobro de líquidos. En esta área cobra mucha importancia el estudio de la formación de hidratos y la selección de inhibidores y puntos de inyección de los mismos.

➤ Área de separación fría aguas debajo de la válvula de estrangulación y es donde ocurre significativamente la condensación de hidrocarburos e igualmente el acondicionamiento de la cricondenterma.

➤ Área de gas a ventas encontramos medición, control de calidad y si está el gas bajo especificaciones RUT, posterior fiscalización con la entrada al sistema de transporte.

➤ Área de tratamiento de LGN los líquidos de gas natural generados durante todo el proceso son recolectados y enviados a estabilización y/o fraccionamiento para obtener los subproductos.

➤ Área de compresión del gas producto del calentamiento de los LGN, puede que los vapores de cima sean lo suficientemente pobres que podrían ser cargados a la línea de ventas. En esta área es de importancia estudiar la proporción debido al impacto o consecuencia que pueda generar en el aumento del poder calorífico y el cumplimiento de RUT.

➤ área de almacenamiento y despacho de LGN los subproductos líquidos ya estabilizados son almacenados y de ser necesarios despachados por tractocamiones o inyectados al sistema nacional de transporte.

3.2.2.2 Sistemas auxiliares

➤ Área de teas indispensables para tener control cuando se presenta cualquier valor de presión por encima de lo normal. Es el alivio de la planta y el nivel de líquido en las vasijas debe ser de estricto control como el mantenimiento de las bombas de evacuación de líquidos de las mismas.

➤ Área de tratamiento de aguas de producción para poder retirar cualquier traza de hidrocarburos antes de darle deposición final y no impactar negativamente al medio ambiente.

➤ Área de drenaje cerrado red de tuberías y vasija de baja presión donde concurren todos los fondos de los equipos estáticos de la planta. Indispensable para desocupar vasijas y de manejo muy estricto por los diferenciales de presiones que se puedan manejar entre la vasija que se está drenando y la vasija de baja presión.

➤ Área de regeneración de glicol se retira el vapor de agua asociado, para volver a inyectar glicol pobre al proceso.

➤ Área de inyección de químicos según lo requiera o no el proceso.

➤ Área de aceite caliente para suplir la demanda térmica de rehervidores o algún otro equipo o unidad que demande calor.

3.2.2.3 Sistemas industriales

➤ Área de gas combustible para la generación de energía eléctrica y autoconsumo en casinos.

➤ Área de aire de instrumentos alimentación para todos los actuadores neumáticos.

➤ Área de sistema contra incendios con bombas tanto de motor eléctrico, como de motores Diesel de respaldo.

- Área de generación eléctrica corazón motriz de toda turbomáquina o maquinaria de desplazamiento positivo de cualquier otra área. Debe existir un generador aparte que funcione con motor diésel de respaldo.
- Área de distribución eléctrica se regula y distribuye la potencia según la demanda de cada motor para cada punto en específico.
- Área de cuarto de control y comunicaciones para monitoreo y control de variables en caso de tener PLC, o monitoreo, control y acción de los actuadores en caso de contar con sistema de control distribuido.

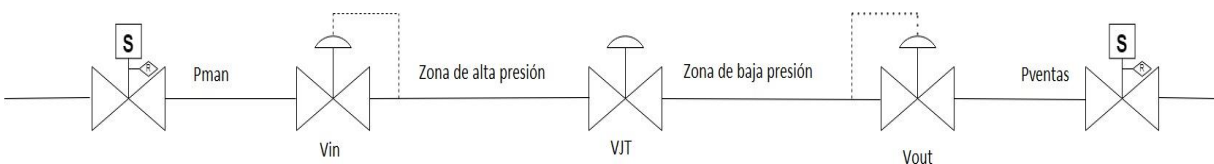
4. Planta de Estudio

4.1 Flujo a través de una Planta JT

Naturalmente para que exista flujo de gas, debe existir un potencial mecánico que genere al sistema buscar su equilibrio termodinámico y por lo tanto tratar de igualar las presiones. Es decir, fluir de alta a baja presión. Para que exista dicho flujo, basta con que exista un mínimo de potencial; pero, para que se genere el efecto Joule Thomson, o sea el enfriamiento isoentálpico que genere el recobro de líquidos de gas natural, este potencial debe ser significativo.

Figura 7.

Planta JT de Estudio



Se estudiará el flujo de la planta presentada en la figura 7. Como se aprecia tenemos 4 niveles de presión (Presión en el manifold de producción, zona de alta presión, zona de baja presión y presión en la zona de ventas).

Para el estudio del flujo se presentan los cinco actuadores principales que intervienen (válvula de corte de entrada, válvula de control de entrada, válvula de control JT, válvula de control de salida).

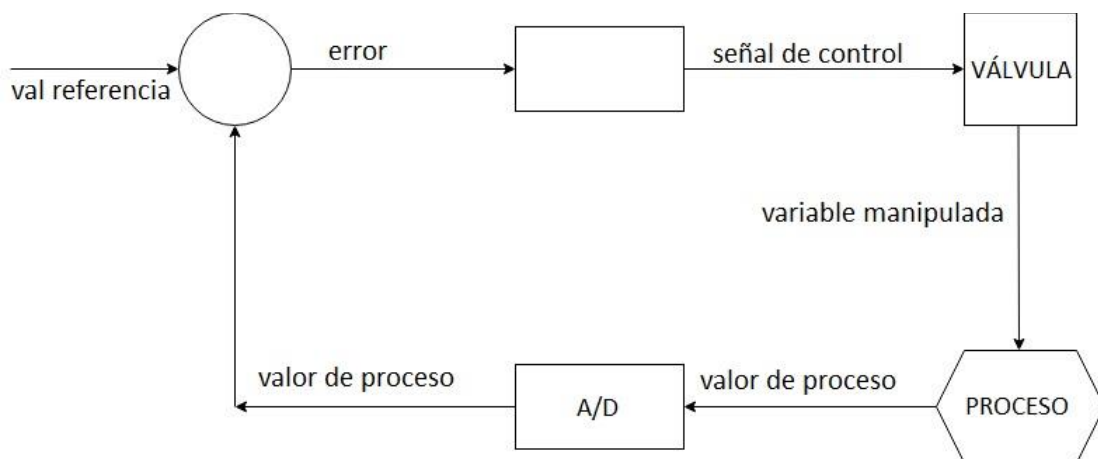
Las válvulas de control pueden funcionar de dos modos:

1. Manual (lazo de control abierto): el operador le da el valor deseado de apertura a la válvula de 0 a 100%.

2. Automático (lazo de control cerrado): el controlador de la válvula recibe un valor de proceso (digital), lo compara con un valor de referencia ya establecido. Genera un error y envía una señal de control actuador ordenando abrir o cerrar según el signo del error para modificar el valor de proceso y realimentar al controlador. Ver figura 8

Figura 8.

Lazo de Control Cerrado con Retroalimentación



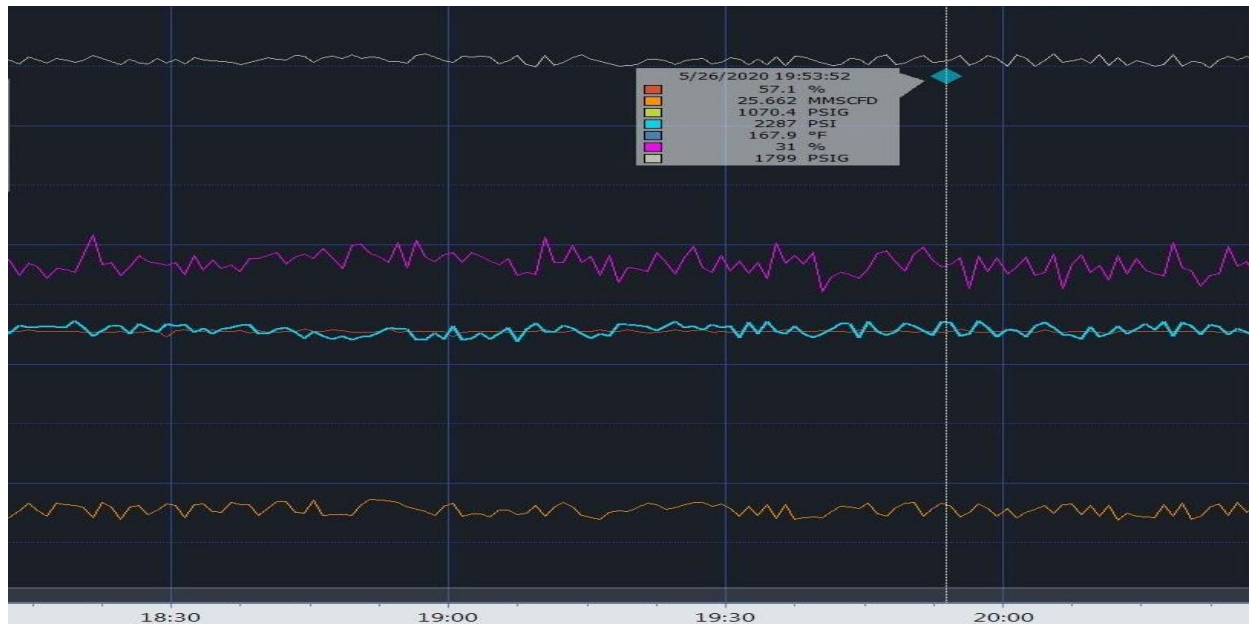
Entonces:

Con las válvulas de corte abiertas, la válvula de control de entrada en modo automático con valor de referencia Pin, la válvula JT en modo manual con x% de apertura, y la válvula de salida en automático con valor de referencia Pout voy a tener determinado flujo por la planta. Es de resaltar que la válvula de entrada es de contrapresión (obtiene el valor de proceso aguas abajo), y la válvula de salida de presión (obtiene el valor de proceso aguas arriba). Debido a esta configuración, el flujo a través de la planta dependerá principalmente de la apertura de la válvula JT, ya que las válvulas de entrada y salida responderán es al valor de presión de referencia y ajustar el error a cero.

Por lo tanto, es de esperar una estabilidad operacional en la planta con un valor fijo de apertura para la válvula JT. Ver figura 9

Figura 9.

Tendencia con Porcentaje de Apertura Válvula JT invariable



Nota: Cortesía de Campo Colombiano

Siendo la línea roja el porcentaje de apertura de la válvula JT y la naranja el caudal en ventas.

El diferencial de presión para el efecto Joule Thomson $P_1 - P_2$ donde:

$$P_1 = P_{in} - \Delta P_{zona\ de\ baja}$$

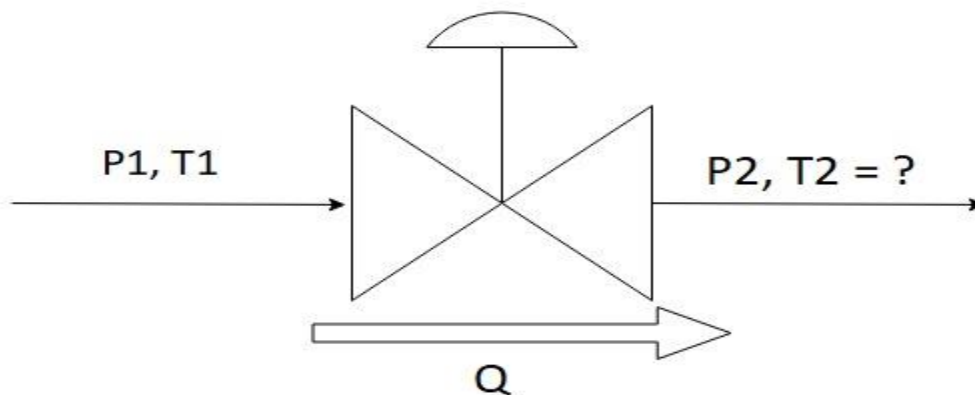
$$P_2 = P_{out} - \Delta P_{zona\ de\ baja}$$

Siendo ΔP la pérdida de presión por accesorios y tubería.

La temperatura de entrada a la válvula JT T_1 estará definida por la temperatura de los pozos y la eficiencia de la transferencia de calor del enfriamiento mecánico en la zona de alta presión de la planta y la temperatura del separador frío T_2 resultante del enfriamiento isoentálpico por la expansión adiabática (efecto Joule Thomson) estará definida por T_1 , ΔP , y Q (el caudal a través de la válvula JT; es decir, de la apertura de la misma). Ver figura 10

Figura 10.

Variables Válvula JT



El recobro de líquidos de gas natural es función del valor T_2 y por lo tanto el acondicionamiento del punto de rocío de hidrocarburo. Entre más frío, mayor condensación y menor cricondenterma.

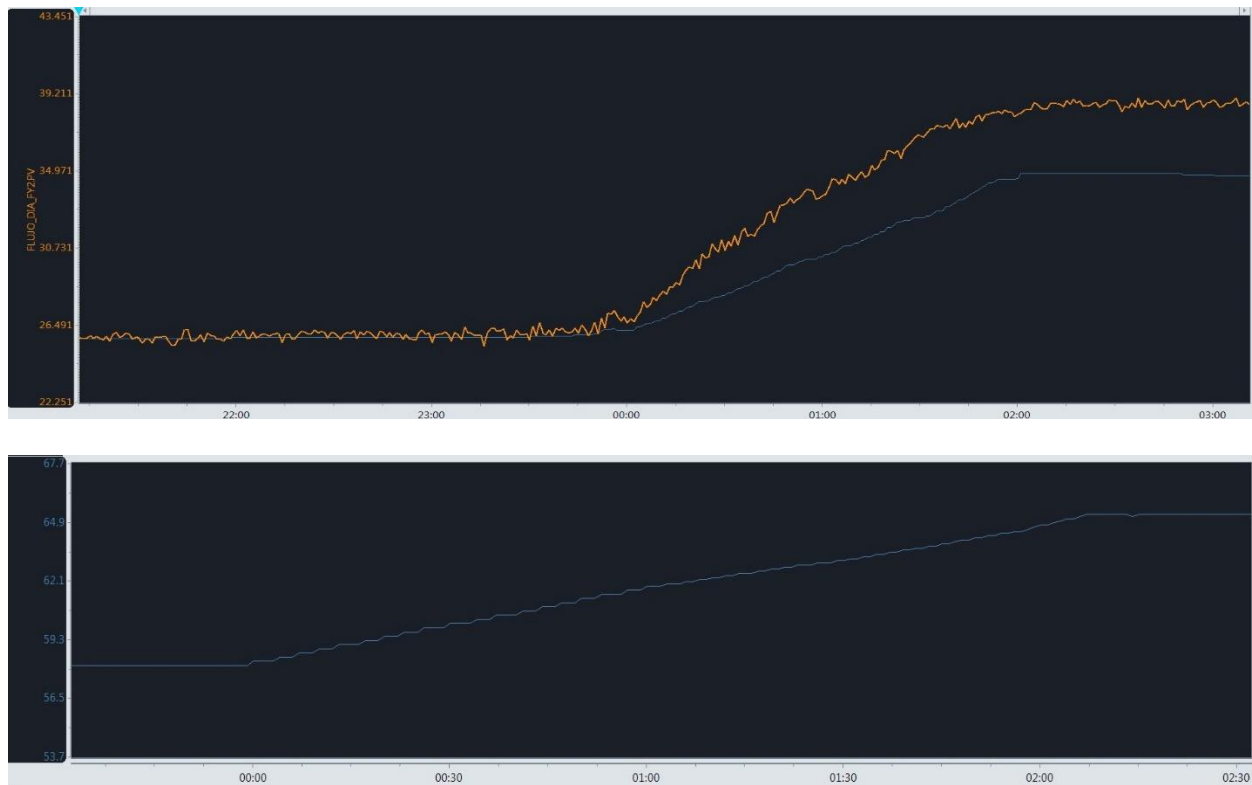
Sin embargo, hay que tener muy en cuenta las limitantes metalúrgicas del separador frío y los valores permitidos de temperatura de la instrumentación.

4.2 Variación del Flujo en una Planta JT

Como ya se dedujo anteriormente, el flujo a través de una planta JT depende principalmente del porcentaje de apertura de la válvula Joule Thomson. Ver figura 11

Figura 11.

Porcentaje de Apertura Válvula JT y Caudal



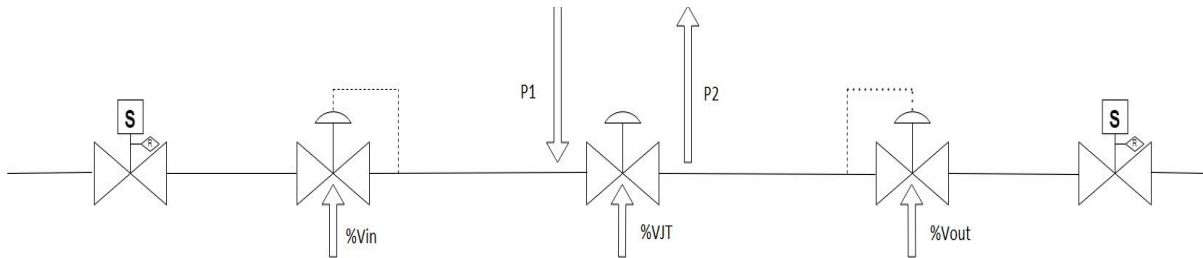
Nota: Cortesía de Campo Colombiano

En la figura 11 se puede corroborar lo anteriormente deducido y se corrobora como desde las 00:00 horas hasta las 02:00 horas el flujo aumentó de 26 MMSCFD a 39 MMSCFD, cuando la válvula JT aumento su porcentaje de apertura de 58% a 65% aproximadamente.

Cuando por efectos de nominación o alguna situación relacionada con la operación se requiere variar el flujo de la planta ya sea en aumento o disminución, se debe proceder entonces a aumentar o disminuir el porcentaje de apertura de la válvula JT.

Figura 12.

Aumento de Flujo Válvula JT



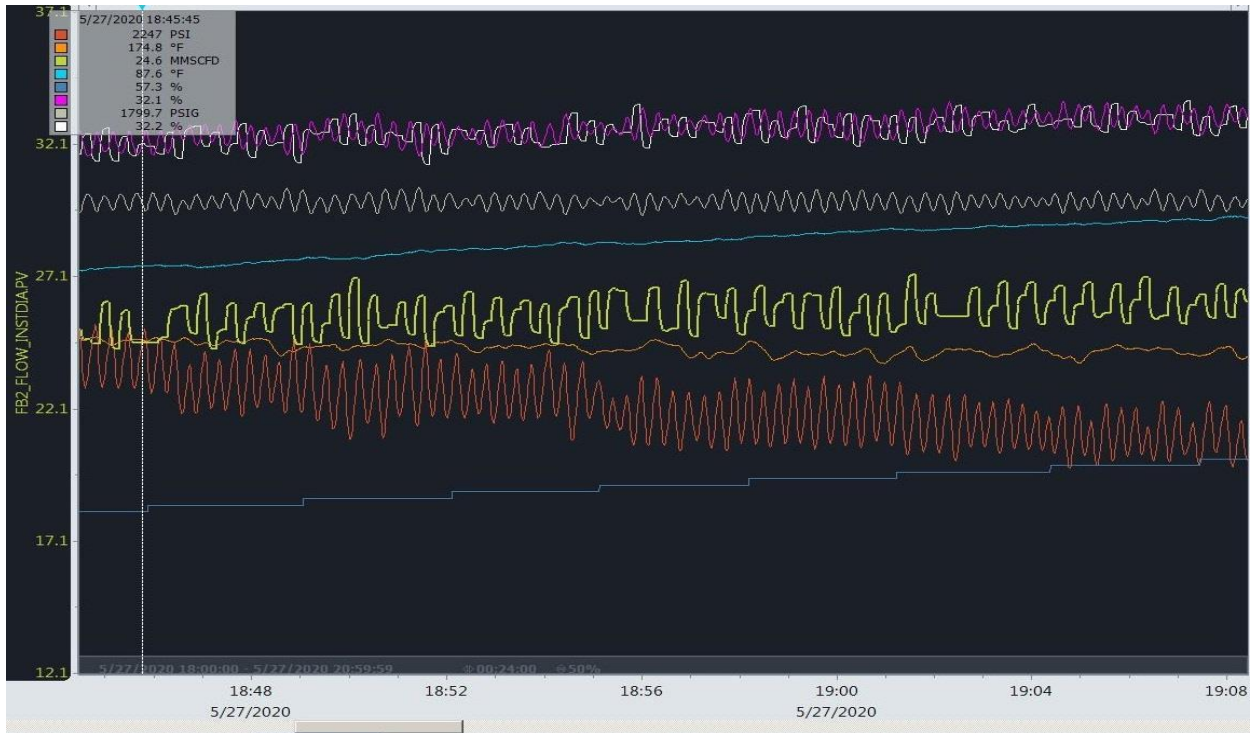
Como se observa en la figura 12, cuando vamos a aumentar el flujo por la planta aumentamos el porcentaje de apertura de la válvula JT e inmediatamente:

El valor de P1 disminuye y el de P2 aumenta en ese instante. Como la válvula de entrada controla aguas abajo debe abrir para compensar la disminución de P1 y como la válvula de control de salida controla aguas arriba, debe abrir para aliviar el aumento de presión en P2. De esta manera tendremos mayor flujo por la planta con igual diferencial de presión.

Como la carga aumenta, los niveles en el separador inicial, están afectados de manera directa e inmediata. Las válvulas de control de nivel funcionando en modo automático deben abrir para poder mantener el mismo valor de referencia con mayor cantidad de líquido en la vasija.

Figura 13.

Respuesta al Aumento de Flujo

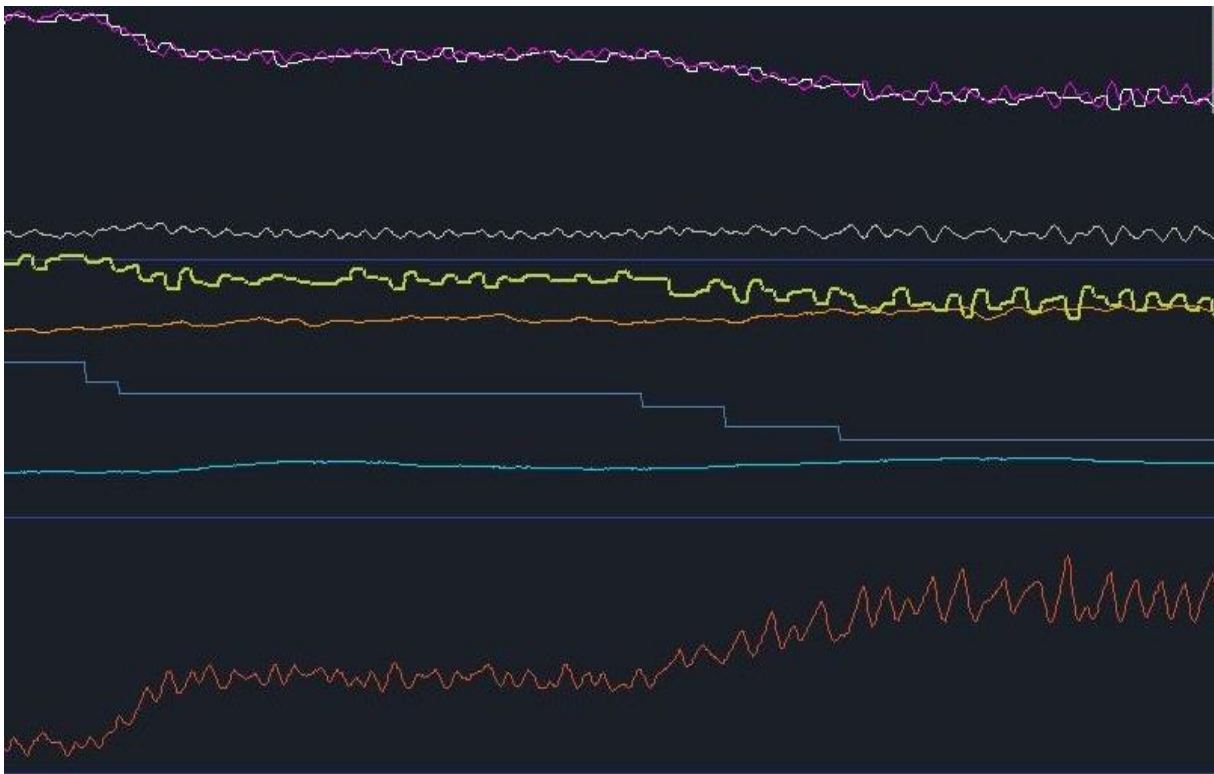


Nota: Cortesía de Campo Colombiano

Como se aprecia en la figura 13, El valor de referencia de la válvula de entrada estaba fijado en 1800 psig (color gris), la válvula JT abrió de 57,3% a 59,2% (color azul) provocando un aumento en el flujo de 24,6 MMSCFD a 27,1 MMSCFD (color amarillo). Para poder mantener el valor de referencia la válvula de entrada aumento su porcentaje de apertura de 32,2% a 35,2% (color blanco) produciendo un descenso en el valor de presión del manifold de producción de 2247 psig a 2149 psig (color rojo).

Figura 14.

Respuesta a la Disminución del Flujo



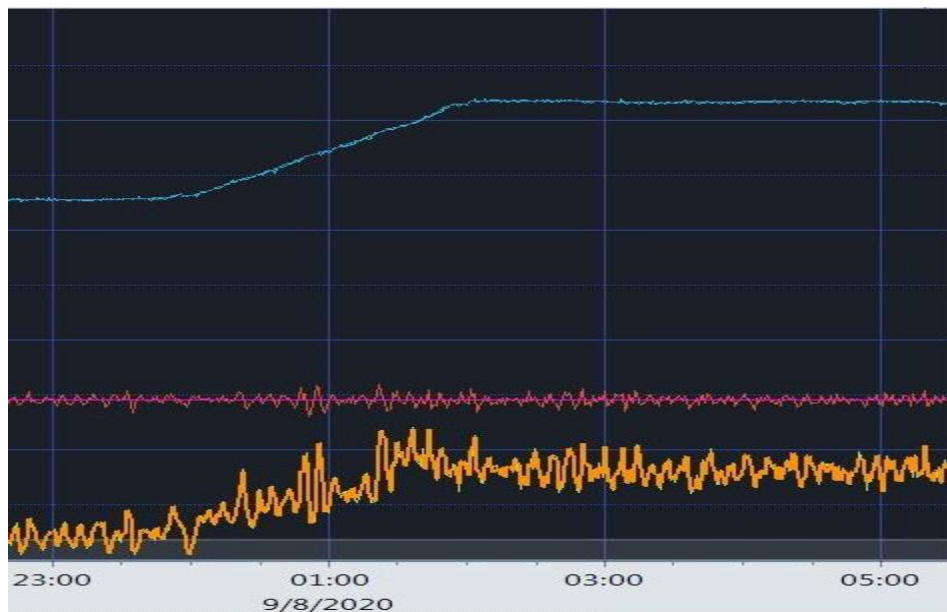
Nota: Cortesía de Campo Colombiano

Es de importancia resaltar la estabilidad en el proceso cuando el ajuste de carga se hace gradualmente, de manera controlada y consciente de los tiempos de estabilización para que todos los lazos de control de las válvulas de control de nivel alcancen a actuar ya que estos están

programados para cierta velocidad de respuesta y una perturbación drástica podría desestabilizar el comportamiento de la misma debido al aumento del error (diferencia entre el valor de proceso y el valor de referencia). Los niveles del separador de entrada son los inmediatamente afectados; sin embargo, cuando el aumento se hace cumpliendo lo anteriormente descrito, la estabilidad se mantiene.

Figura 15.

Respuesta Válvula Control de Nivel del Separador de Entrada



Nota: Cortesía de Campo Colombiano

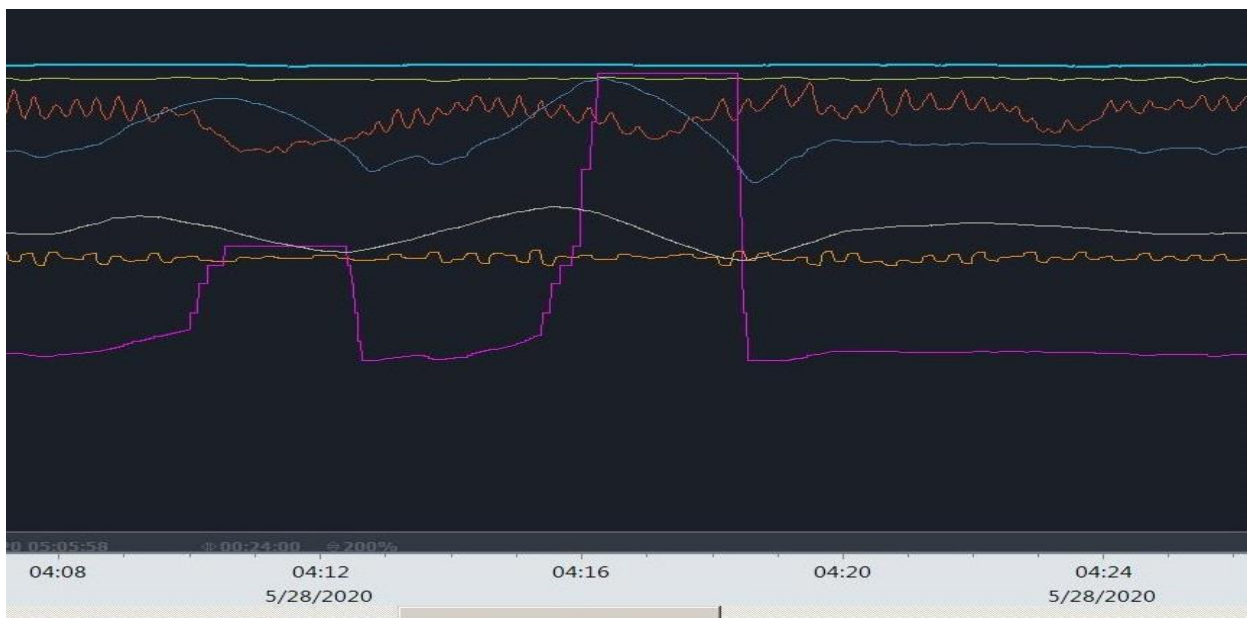
En la figura 15 podemos observar como desde las 00:00 hasta las 02:00 se aumentó carga (tendencia de color celeste). El valor de referencia es la tendencia de color violeta, el valor de proceso es la tendencia de color rojo y la variable manipulada es la tendencia de color naranja. Es decir, a medida que se aumentaba carga, había más separación de líquido en el separador de entrada, razón por la cual para que el valor de proceso no se desviara significativamente del valor de referencia la válvula respondió aumentando su apertura y controlando el cambio de dicha variable. Esto se logra, gracias al aumento gradual y controlado.

Si el ajuste de carga es controlado y gradual como se ha visto en las tendencias anteriores, todos los lazos de control de la planta alcanzan a responder tanto los de presión, como los de nivel y temperatura de toda la planta en la medida que dicha modificación de flujo los vaya afectando. Primero actúan los de presión, seguidos por los de nivel y de último los de temperatura.

Existen ocasiones en las cuales los valores de nominación de un día para otro son variados drásticamente. O de renominación el mismo día también son modificados con valores y a horas no adecuadas debido a la venta que ya se ha venido acumulando a lo largo del día. Por ello, el área de operaciones debería darle apertura rápida a la válvula JT, lo cual de inmediato genera un aumento acelerado y descontrola de líquidos en el separador de entrada que no permite a la válvula de control tener una respuesta adecuada. Esto, produce una condición no segura por lo que el área de operaciones debe entrar a controlar manualmente el nivel, bajar carga rápidamente sin lograr ningún aumento significativo entonces en el flujo. Ver figura 16

Figura 16.

Aumento no Controlado de Carga



Nota: Cortesía de Campo Colombiano

En la figura se observa como en un intervalo poco de tiempo se le da una apertura drástica a la válvula JT (tendencia azul), lo que genera un aumento inmediato en los líquidos del separador de entrada (tendencia blanca) que obliga a la válvula a abrir drásticamente (tendencia violeta). Se volvió a intentar una segunda vez y fue mayor la afectación en la estabilidad.

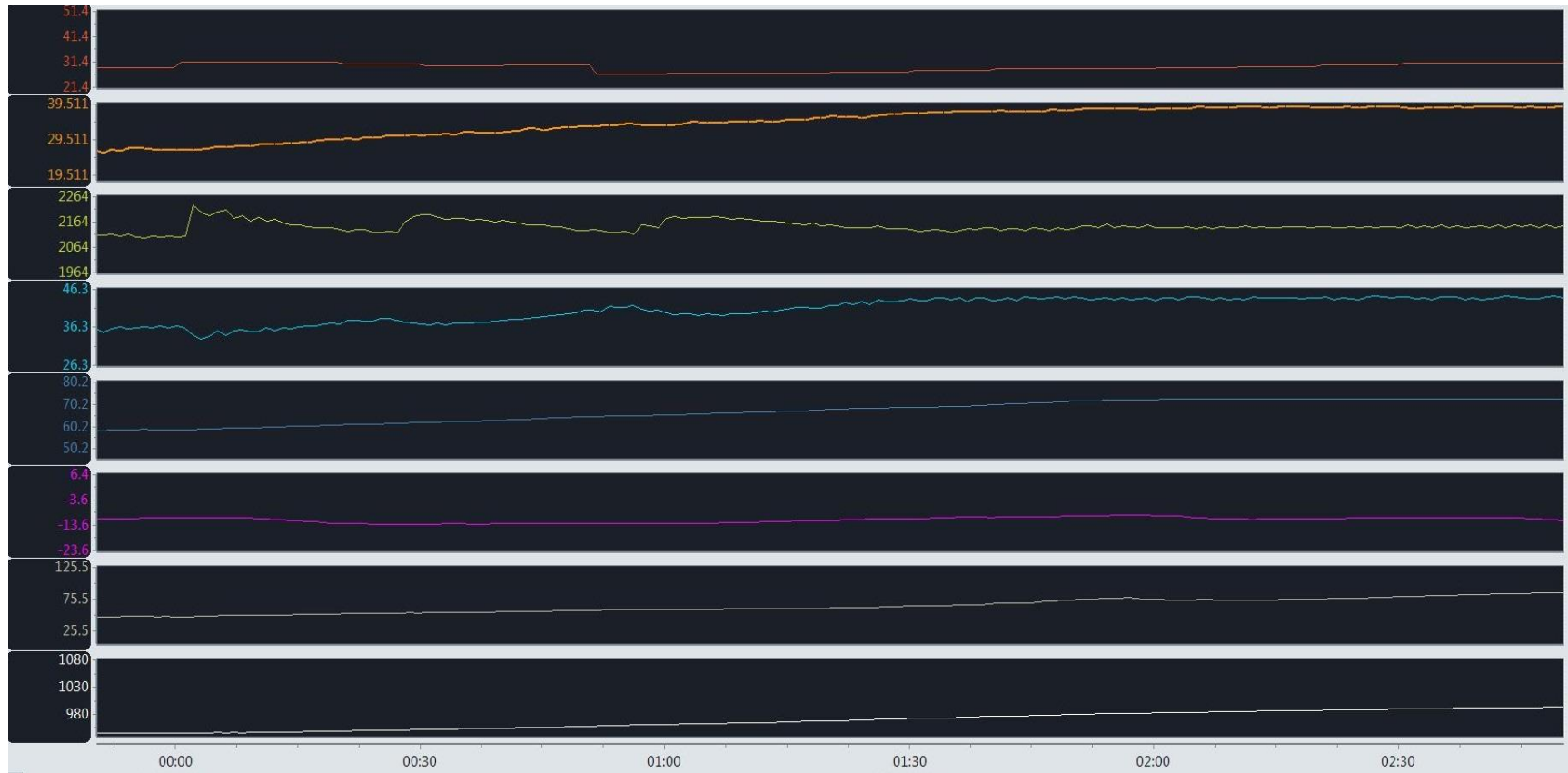
Cuando la tasa de variación del flujo no es tan drástica que los lazos de control de nivel alcanzan a responder; pero, de igual manera no es gradual ni controlada sin dejar tiempos de estabilización adecuados entre movimientos, la generación de líquidos se dará con mayor celeridad y los lazos de control de temperatura son de respuesta lenta por lo tanto tendremos inestabilidad en los puntos de demanda térmica como la estabilización o fraccionamiento de los líquidos de gas natural y la regeneración de glicol.

De igual manera, cuando la variación es al aumento, la apertura de la válvula de control de entrada responde rápidamente, ocasionando una caída drástica de presión que puede ocasionar un efecto succión en los yacimientos.

5. Resultados y Análisis de Resultados

Figura 17.

Aumento de Carga Controlado con Apertura de Choke



Nota: Cortesía de un Campo Colombiano

Para modificar el flujo que atraviesa por la planta de procesamiento de gas natural en estudio, se debe modificar la apertura de la válvula JT.

La manera más adecuada de realizar es estos ajustes es de manera gradual, controlada y dejando un tiempo de estabilización entre cada movimiento para no alterar drásticamente ninguna variable del proceso. De igual manera, ir dando apertura a los choques de los pozos de forma gradual para no llegar a afectar el yacimiento.

En la figura 17 se plasman las tendencias de un aumento de carga con las siguientes variables de arriba hacia abajo: punto de rocío de hidrocarburos, flujo, presión del manifold de producción, apertura de la válvula de entrada, apertura de la válvula JT, temperatura del separador frío, apertura de la válvula de salida y la presión del gasoducto.

6. Conclusiones

El flujo que atraviesa la planta JT se modifica con la apertura de la válvula JT-, esto, genera una respuesta inmediata en las válvulas de entrada y salida de la planta, así como en los niveles del separador de entrada.

La tasa de variación del flujo afecta directa o indirectamente, de manera inmediata, rápida o tardía, todas las variables de proceso. Por ello, esta tasa debe estar ajustada a tiempos prudentes y con conocimiento de causa.

Un cambio no controlado del flujo puede llevar a variaciones de presión drásticas, aumento o pérdida de niveles e inestabilidad térmica en las áreas que la requieran. Esto, podría causar afectación en la producción, daño en equipos y podría llegar a afectar la integridad de los yacimientos.

7. Recomendaciones

Realizar recopilación y análisis de tendencias y lecciones aprendidas para determinar y unificar tiempos para la apertura de la válvula JT.

Tener comunicación directa y oportuna con la gerencia de gas para garantizar unos cambios razonables en la nominación de acuerdo con las condiciones actuales.

Estar siempre acompañando el personal de plataforma de pozos con la apertura del choke cuando se realicen ajustes y realizar ajustes proporcionales.

Al momento de ir variando el caudal, ir paralelamente ajustando las inyecciones de glicol y el valor de referencia de temperatura del sistema de aceite caliente.

Referencias Bibliográficas

- Campbell, J. (2003). Technical Assistance Service for the Design, Operation and Maintenance of Gas Plants, John Campbell and Company, Capítulo 11.
- Chuchimaque Lugo, Julián Eduardo. (2006). Evaluación del efecto joule Thomson y el holdup de líquido en sistemas de transporte de gas natural. Universidad Industrial de Santander.
- Edminster, W.C. (1988). Applied Hydrocarbon Thermodynamics, Vol. 2, Houston.
- Pérez Palacio, Ramiro; Martínez, Marcías J. (sf). Ingeniería del Gas Natural. Características y comportamiento de los Hidrocarburos.
- Miller, D.G. (1970). Industrial Engineering Chemical Fundamentals, 9. 585-589
- Perry, R. y otros. (1992). Manual de Ingeniero Químico. Tercera edición.
- Ribón, Helena Margarita. (2018). Módulo propiedades de los hidrocarburos.
- Santos, Nicolás. (2011). Especialización Ingeniería del Gas. Recobro de Líquidos de Gas Natural.
- Smith, J.M.; Van Ness, H.C.; Abbott, M.M.; Swihart, M.T. (1989). Introducción a la Termodinámica e Ingeniería Química. Cuarta edición.