

Diseño de Varillas de Bombeo Mecánico aplicando GeoGebra.

José V. Trinidad P.

Tecnológico Nacional de México Campus Cerro Azul. Veracruz, México.

Departamento de Ciencias Básicas, Academia de Ingeniería Petrolera.

jose.tp@cerroazul.tecnm.mx

Abstract: In the oil industry, wells reduce their production due to depletion in reservoir pressures. Artificial production systems provide additional energy to the well, within these technologies there is Mechanical Pumping, which one of its main elements are suction rods which are subjected to stress. The wrong calculation of the stresses results in physical damage to the rods. The objective of this work is to design a graphic model with geometric qualities that has the Modified Goodman Diagram, which will help us calculate and interpret the stresses on the rods and other parameters to determine if the rods are overloaded or not.

Resumen: En la industria petrolera los pozos reducen su producción por abatimiento en las presiones de yacimiento. Los sistemas artificiales de producción aportan energía adicional al pozo, dentro de estas tecnologías existe el Bombeo Mecánico, el cuál uno de sus elementos principales son las varillas de succión las cuales están sometidas a esfuerzos. El cálculo erróneo de los esfuerzos trae como consecuencia daños físicos en las varillas. El objetivo de este trabajo es diseñar un modelo gráfico con cualidades geométricas que tiene el Diagrama de Goodman Modificado, el cual, nos ayudará a calcular e interpretar los esfuerzos en las varillas y otros parámetros para determinar si las varillas están sobrecargadas o no.

INTRODUCCIÓN.

El Tecnológico Nacional de México (TecNM) está comprometido con la mejora de los procesos de enseñanza-aprendizaje, por lo que a través de diversas estrategias busca implementar materiales didácticos y modelos digitales para complementar a través de prácticas de laboratorio y simulaciones con software el conocimiento. Entre la oferta educativa del TecNM están algunas ingenierías dentro del ramo de energía, como por ejemplo la Ingeniería Petrolera. En la Industria de los Hidrocarburos se utilizan tecnologías alternas como los Sistemas Artificiales de Producción, que son considerados equipos adicionales al aparejo de producción aportando energía adicional al pozo cuando éstos tienden a perder presión, el uso de esta tecnología ayuda a recuperar la producción perdida. Estos sistemas se retoman como una asignatura basada en ingeniería aplicada. Dentro de los Sistemas Artificiales, el Bombeo Mecánico Convencional es el más utilizado en el mundo; su función es extraer hidrocarburos mediante movimientos reciprocantes, que se transmiten por medio de varillas de acero las cuales se acoplan a una bomba en el fondo del pozo y así se aprovecha la extracción de petróleo a través de un método de levantamiento artificial.

En el diseño de varillas existen diferentes programas para simular su operatividad bajo ciertas cargas y condiciones, sin embargo, los softwares de diseño de Bombeo Mecánico Convencional tienen licencias costosas o de uso exclusivo de las compañías petroleras. Además, ninguno tiende a graficar el Diagrama de Goodman Modificado, siendo este esencial para el diseño total de varillas, el acoplamiento de todas las varillas se conoce como sarta, limitándose únicamente en mostrar el resultado numérico del cálculo de los esfuerzos mínimo, máximo y admisible, así como otras características que son propias del fabricante.

JUSTIFICACIÓN.

El TecNM incluyó dentro de su oferta de carreras, el programa educativo de Ingeniería Petrolera, esto con el objeto de brindar una alternativa a la comunidad estudiantil incluirse en el ramo petrolero. Dentro del perfil de egreso existe el siguiente apartado: Manejar software específico para el diseño, simulación y operación de los sistemas de exploración y producción de hidrocarburos. Los docentes en el quehacer educativo han utilizado algunos equipos de laboratorio de otras áreas para complementar lo visto en clase, con actividades prácticas y de campo bajo el esquema de competencias. México se ha destacado como uno de los países petroleros más importantes del mundo. Con la Reforma Energética implementada hace unos años se abren posibilidades de inclusión para estudiantes de ingeniería, sin embargo, las tecnologías de levantamiento artificial no se pueden emular dentro de un laboratorio común con equipos de física, simuladores simples de mecánica de fluidos o hidráulica, por lo que solo se limitan a la parte teórica.

Es por eso que el presente trabajo aborda la problemática de simular el diseño de los cálculos de esfuerzos en las varillas de Bombeo Mecánico Convencional creando un modelo gráfico aplicando GeoGebra y el Diagrama de Goodman Modificado, con este modelo los cálculos de esfuerzos se realizarán de una manera fácil y rápida con diferentes factores de servicio, distintos grados de acero y diámetros.

MARCO TEÓRICO

Los Sistemas Artificiales son considerados equipos adicionales al aparejo de producción; agregando energía adicional [Díaz Zertuche 1988]. El bombeo mecánico es el más utilizado en el mundo (véase figura 1); su función es extraer fluidos mediante un movimiento recíprocante, que se transmite por medio de la sarta de varillas acoplada a una bomba en el fondo del pozo.



Figura 1. Bombeo Mecánico Convencional.

La mayoría de los fabricantes de varillas de bombeo (véase figura 2) utilizan la norma API según el tipo de carga y el nivel de corrosión como factor de servicio en los pozos, también se disponen distintos grados de acero y diámetros que van de un octavo de pulgada hasta 3 pulgadas de sección transversal [Tenaris-Tamsa 2019].



Figura 2. Varillas API para Bombeo Mecánico.

Los fabricantes utilizan tablas con datos técnicos y diagramas siendo el Diagrama de Goodman Modificado (véase figura 3) el específico para calcular esfuerzos a las que están sometidas las varillas de bombeo mecánico.

La geometría básica del Diagrama de Goodman Modificado [Gabor T. 2003] permite identificar zonas operativas normales y de riesgo, teniendo como límites la zona triangular limitada por los esfuerzos máximo admisible y esfuerzo mínimo, adicionalmente se agrega una tabla de las condiciones de factor de servicio en el cual las varillas de succión operaran en condiciones con presencia de agua, gases, vapor, etc.

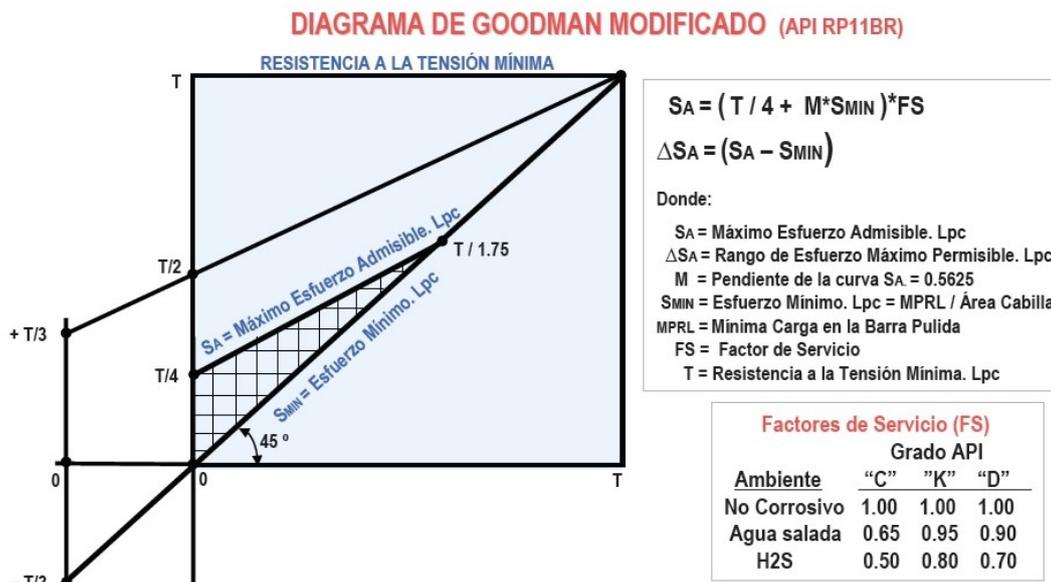


Figura 3. Diagrama de Goodman Modificado.

Planteamiento.

Diseñar un modelo gráfico con el Diagrama de Goodman Modificado, y bajo la práctica recomendada API RP 11 BR para el diseño de varillas además de utilizar el método número dos de la compañía Landmark [Halliburton 2008] cuyo criterio principal es igualar los esfuerzos actuantes en el tope de cada diámetro de las varillas, sin exceder el esfuerzo admisible. Como condición principal, y a fin de dictaminar si una sarta de varillas está o no está sobrecargada entonces, el resultado del esfuerzo máximo debe ser menor igual al esfuerzo admisible.

Objetivo general.

Calcular y graficar los esfuerzos máximos, mínimos y admisible de una sarta de varillas considerando los diámetros, el grado de acero, y el factor de servicio que considera el ambiente corrosivo del pozo. El resultado de los esfuerzos permitirá conocer si la sarta de varillas se sobrecarga o cumple con el diseño para funcionar de manera correcta. Con esto el usuario de esta pequeña aplicación podrá emitir un dictamen si la varilla está en condiciones de instalarse y someterse a esas cargas o simplemente utilizar otras varillas que tengan y cumplan los parámetros de diseño.

Objetivos específicos.

- ✓ Aplicar la geometría plana para la construcción del diagrama.
- ✓ Seleccionar el tipo de varilla, grado de acero y diámetro.
- ✓ Utilizar y aplicar las variables de Factor de Servicio y Tensión mínima de acuerdo al grado de acero de la varilla.
- ✓ Organizar y elegir los elementos para la construcción del Diagrama de Goodman Modificado.

- ✓ Seleccionar y en su caso analizar las diferentes herramientas y comandos de GeoGebra para construir el modelo gráfico.

Interrogantes previas al diseño.

¿Cuál sería la vista correcta en GeoGebra para representar el Diagrama de Goodman Modificado? ¿Es conveniente utilizar figuras planas como rectángulos y triángulos para construir de manera fácil el diagrama? ¿Qué tipo de varilla será la apropiada para el cálculo? ¿Utilizar el Factor de Servicio como constante o variable global? ¿Cuántas herramientas y elementos se deben utilizar? ¿Utilizar deslizadores o casillas de control?

El modelo gráfico se crea en la vista gráfica de GeoGebra, las herramientas de segmento de recta entre dos puntos, se utilizan dos deslizadores, uno para controlar el rango del grado de acero de la varilla, y otro deslizador controla el diámetro de la varilla que varía en incrementos de 1/8", adicionalmente se utiliza dos casillas de entrada para ingresar las cargas máximas y mínimas en la sarta de varillas; éstas se obtienen de cartas dinámométricas. Se utiliza texto con formula Latex para crear rótulos informativos de los cálculos de los esfuerzos. Con estas herramientas se puede manipular el Diagrama de Goodman Modificado en tiempo real.

Diseño general.

Para la construcción del Diagrama de Goodman Modificado aplicando GeoGebra, se decide utilizar la Vista Algebraica y la Vista Gráfica. Posteriormente se identifican y se utilizan 3 elementos importantes para el desarrollo del cálculo de esfuerzos: 1.- El grado de acero API de la varilla de bombeo que está clasificadas en: Grado API C: 90,000 PSI, Grado D: 115,000 PSI, y Grado K: 85,000 PSI. Y al ser estos valores constantes representarlos con un deslizador, con rango de 85000-115000 con incrementos de 5000 PSI.

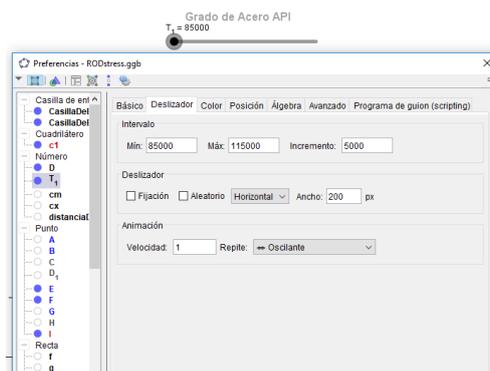


Figura 4. Deslizador Grado de Acero API

2.- La carga máxima y mínima de la sarta de varillas, también es un valor numérico que se obtiene de forma externa, pero a su vez variable, se optó por utilizar dos casillas de control para ingresar estos datos y almacenarlas en dos variables globales llamadas cm y cx.

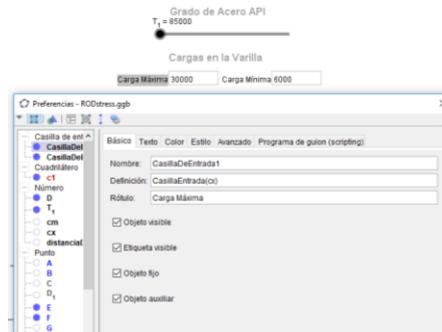


Figura 5. Cargas en la Varilla cx, cm y otras variables.

3.- El diámetro de la varilla, y de acuerdo al estándar API 11 BR, que dice que los rangos de las varillas varían de 1/8” se llegó a la decisión de utilizar un deslizador con rangos de 1/8” hasta 3” (véase figura 6).

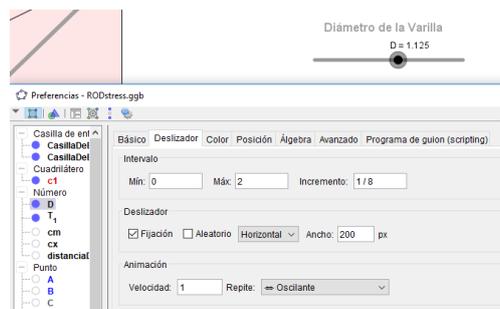


Figura 6. Deslizador Diámetro de la Varilla.

Como el Diagrama de Goodman Modificado es un cubo perfecto, se utilizó la herramienta de punto en los cuatro vértices de éste, utilizando la variable $T_1/1000$ asociada al deslizador del grado de acero según aplica su coordenada y dividiéndola entre mil para tener una escala de 10:1. Así también los puntos $T/2$, $T/4$ y $T/1.75$ (véase figura 7), donde T es la tensión mínima de acuerdo al grado de acero que soportan las varillas, posteriormente se trazan los segmentos de recta entre los puntos correspondientes.

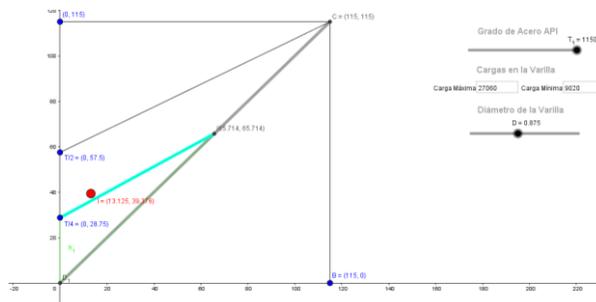


Figura 7. Vértices y cálculos de Tensión.

Para el cálculo de los esfuerzos, S_{min} = esfuerzo mínimo, S_{max} = esfuerzo máximo y SA =esfuerzo Admisible, ΔSA =los rangos de esfuerzos se calculan con las fórmulas presentadas en la figura 3. Los esfuerzos mínimo y máximo están en función del área de la varilla, y las cargas respectivas. Se realizan extracción de valores de x y de y , por ejemplo: $x(I)$ y $y(I)$ los cuales son S_{min} y S_{max} respectivamente.

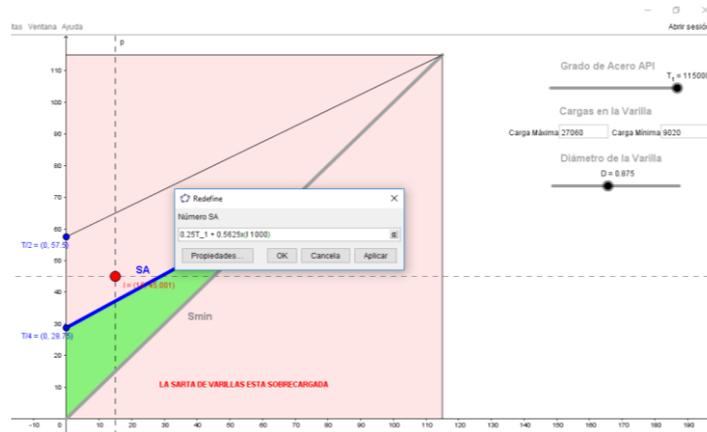


Figura 8. Cálculo de S_{min} , S_{max} y SA , DSA

Para finalizar el Diagrama de Goodman Modificado se da formato a las áreas críticas (cuadrilátero rojo) y áreas de operación (triangulo verde), se agregan los textos como fórmula Latex (véase figura 9) y se agregan objetos (variables donde se calcularon los esfuerzos), por ejemplo: el objeto PC donde se calcula el porcentaje de carga, que es la diferencia del S_{max} y el S_{min} entre el rango de esfuerzos que es el objeto DSA .

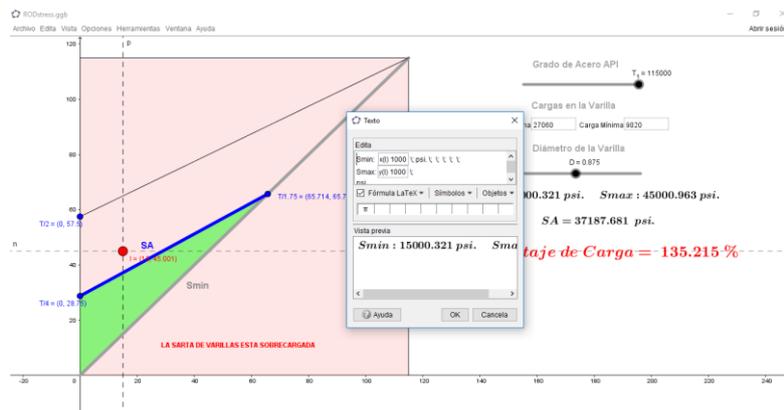


Figura 9. Textos Latex

Se diseñó un punto con formato de círculo rojo, con coordenadas de esfuerzo mínimo para el eje x y esfuerzo máximo para el eje y , a fin de que dicho punto se sitúe dentro del área del cubo rojo o del área del triángulo verde con base a los cálculos de esfuerzo. Se diseñó un letrero con leyendas de “Diseño de Varillas seguro” la condición será $0 < pcarga < 100$ donde “ $pcarga$ ” es la variable que almacena el cálculo del porcentaje de carga (véase figura 10).

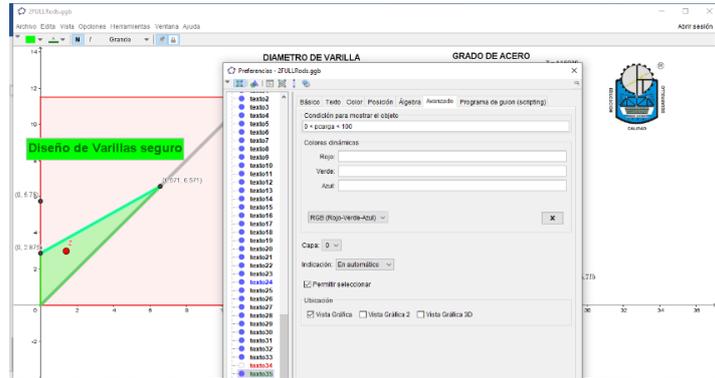


Figura 10. Letrero Latex con condición avanzada.

El otro letrero Latex es “Peligro: Varillas sobrecargadas” para lo cual se utilizaron letreros Latex, la condición para que este letrero se muestre es que la variable $p_{carga} > 100$ (véase figura 11).

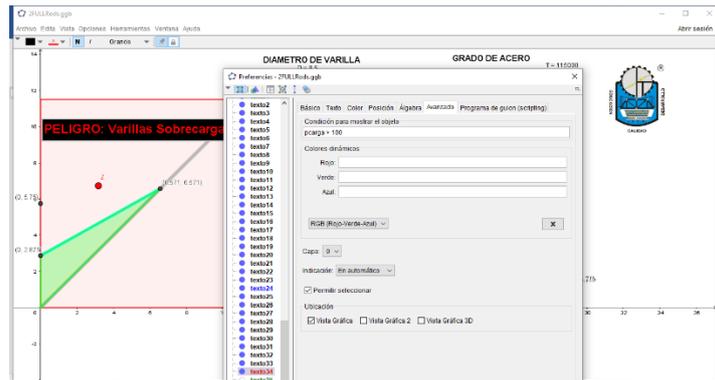


Figura 11. Letrero Latex Error

La vista final del Diseño de Varillas de Bombeo Mecánico (véase figura 12).

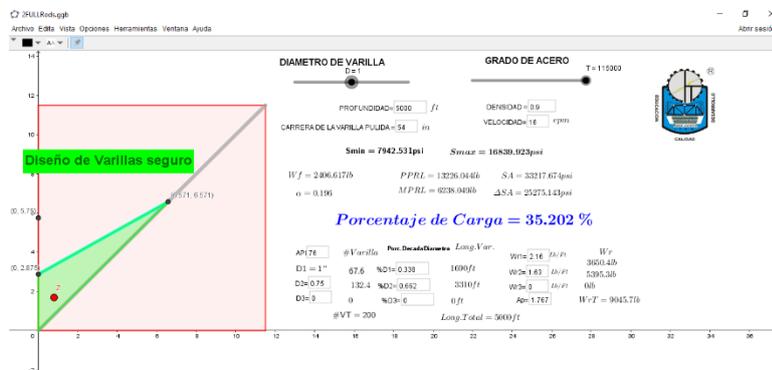


Figura 12. Diagrama de Goodman Modificado, variables y letreros.

CONCLUSIÓN Y/O RECOMENDACIONES.

El diseño de varillas de Bombeo Mecánico aplicando GeoGebra facilitó la capacidad de interpretación en los estudiantes y las personas que interactuaron con esta pequeña aplicación, debido a la simplicidad del diseño y la manipulación de herramientas que conllevan a una simulación básica del Diagrama de Goodman Modificado en tiempo real.

Este diseño de varillas está en su segunda etapa, lo que se pretende en un futuro es incorporarlo a una aplicación en plataforma Android o iOS. Con interfase a sensores de carga directamente colocados en las varillas de succión, para que los datos de carga máxima y mínima sean en tiempo real y que estos datos no sean introducidos de manera manual en casillas de control.

Dentro del diseño se utilizó la vista gráfica en conjunto con la vista algebraica (ésta oculta para tener una mejor organización en pantalla). El Diagrama de Goodman Modificado es una construcción geométrica plana involucrando polígonos triangulares y rectangulares. Se aprovecharon diversas herramientas de GeoGebra para dar formato a los bordes y color a los interiores de estos polígonos generando un mejor formato y presentación.

El uso de este diseño gráfico basado en GeoGebra se recomienda que sea utilizado con un fin académico, ya que se deben contar con ciertos conocimientos previos para manipular las variables que se utilizan e interpretar de manera correcta para dictaminar un diseño seguro y eficiente.

REFERENCIAS.

- Díaz Zertuche, H. (1988), *Operación de bombeo mecánico, Sistemas Artificiales*, Facultad de Ingeniería UNAM México.
- GABOR, T. (2003), *Sucker-Rod Pumping Manual*,
- API (2015), Recommended practice for desing calculations for sucker rod systems.
- M. P. Parameswaran Nampoothiri August (2001), b. tech, evaluation of the effectiveness of API-Modified Goodman Diagram in sucker rod fatigue analysis,
<https://ttu-ir.tdl.org/bitstream/handle/2346/21562/31295017220343.pdf?sequence=1>
- [n.d.] Manuales Landmark. Obtenida el 13 de Septiembre de (2019),
<https://www.halliburton.com/en-US/ps/artificial-lift/artificial-lift.html?node-id=hfqelabr>
- Sucker Rod Pump Surface Unit catalog (2019).
<https://www.slb.com/-/media/files/al/catalog/sucker-rod-pump-surface-units-catalog.ashx>
- Sucker Rods and Couplings Enhanced quality with Schlumberger manufacturing standards (2019).
<https://www.slb.com/-/media/files/al/product-sheet/sucker-rods-couplings-ps.ashx>
- Varillas de Bombeo Mecánico, catalogo (2019), Tenaris-Tamsa.
<http://www.tenaris.com/es-ES/Products/SuckerRods/BeamPumping.aspx>