

ANÁLISIS DE UNIDAD DE BOMBEO USANDO RECURSOS COMPUTACIONALES
PUMP UNIT ANALYSIS USING COMPUTATIONAL RESOURCES

Dr. C. Orestes González Quintero¹ (0000-0001-5596-725X), Universidad de Matanzas,

orestes.gonzalez@umcc.cu

Dr. C. Eleno Alfonso Brindis² (0000-0002-0032-449X), Polytechnic College Suriname. Paramaribo,

Suriname

Ing. Oscar Fernández Fernández¹ (0000-0003-1744-6474)

Resumen

En este estudio los autores se trazaron como objetivo realizar el análisis cinemático y dinámico de una Unidad de Bombeo, utilizando el programa *Working Model 2D* para obtener los valores de la velocidad y la aceleración de cada elemento y el torque del motor en diferentes posiciones del mecanismo de palancas, permitiendo determinar el ángulo para el cual se obtienen los mayores valores de esos parámetros. Se comprobó que el mecanismo tiene un grado de libertad, lo cual concuerda con el hecho de que posee un único elemento motor, solo posee pares cinemáticos con un solo grado de libertad. La aceleración máxima en el órgano de trabajo es de 59,28 m/s², alcanzada en 144° de giro de la manivela y torque máximo en el motor de 7,7 Nm alcanzado a los 115°. Por otra parte, el desplazamiento del órgano de trabajo muestra un carácter bastante regular, su recorrido es de 0,44 m.

Palabras claves: *análisis cinemático y dinámico; mecanismos de palancas; pares cinemáticos; Working Model*

Abstract

In this study the authors set themselves the objective of performing the kinematic and dynamic analysis of a Pumping Unit, using the program Working Model 2D to get the values from velocity, acceleration of each element and motor torque in different positions of the lever mechanism, allowing determining the angle for which the bigger values of those parameters are obtained. It was verified that the mechanism has a single degree of freedom, which agrees with the fact that he has a one driving element, only have kinematic pairs with a single degree of freedom. The maximum acceleration in the working organ is of 59.28 m/s^2 , caught up with in 144° of turn of the crank and maximum torque in the motor of $7,7 \text{ Nm}$ reached at 115° . On the other hand, the displacement of the working organ shows a fairly regular character, its route is 0.44 m .

Key words: *kinematic and dynamic analysis; kinematic pairs; lever mechanism; Working Model*

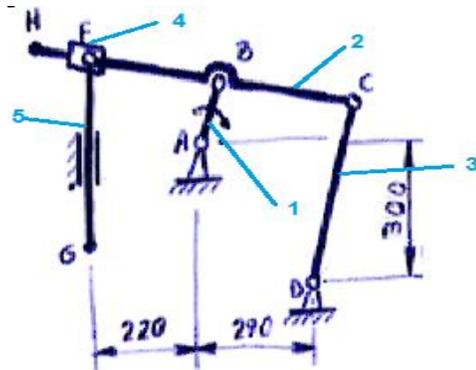
En los mecanismos, los componentes o elementos susceptibles de transmitir fuerza y movimiento son denominados eslabones o barras. Para que el movimiento pueda ser transmitido, los elementos deben estar unidos entre sí, donde el conjunto de superficies que establece el contacto entre las diversas barras de un mecanismo se designa par cinemático (Baranov, 1979) (Golubev, 1978) (Myszka, 2012) (Norton, 2020). En este trabajo los autores realizaron el análisis cinemático del mecanismo de palanca designado: Unidad de bombeo, utilizando el *software Working Model 2D* (Myszka, 2012) para la simulación del funcionamiento del mismo y obtener una serie de datos de gran importancia como son los valores de la velocidad y aceleración lineal en los pares cinemáticos, así como, velocidad y aceleración angular de los elementos del mecanismo en diferentes posiciones. También es posible determinar la fuerza que se genera en los pares cinemáticos. Resulta necesario señalar que estos datos se obtendrán en este estudio, a manera de ilustración, para el órgano de trabajo de este mecanismo, pudiéndose aplicar la misma metodología para todos los elementos y pares cinemáticos de ser necesario.

La técnica actual se caracteriza por la variedad de máquinas, aparatos y construcciones de acción mecánica, donde se incluyen los manipuladores robóticos, que comprenden enlaces casi rígidos, que están conectados por articulaciones que permiten el movimiento relativo de los enlaces vecinos (Davim, 2018). Un manipulador en serie es un conjunto de cuerpos conectados en una cadena por articulaciones, como ocurre en los mecanismos típicos. Es por ello que los ingenieros de las distintas especialidades mecánicas de construcción de tecnología y explotación deben conocer y saber trabajar con los fundamentos de los distintos métodos de análisis, de síntesis (proyección) de las máquinas y mecanismos, solucionando distintos tipos de tareas, analizando la significación, sentido y enlace funcional de todos los elementos de la máquina a proyectar, sistematizando y utilizando los conocimientos recibidos en su formación (Wickert & Lewis, 2015).

En la actualidad con el desarrollo de la computación es posible la obtención rápida de resultados con calidad, llevando al mínimo los trabajos de rutina del ingeniero, en este estudio usamos el *software Working Model* para la simulación del funcionamiento de la unidad de bombeo, así como *Microsoft Excel*, donde se realizó el análisis de los resultados de la simulación.

Sobre la base de lo anteriormente expuesto se plantea como Objetivo General: realizar el análisis de una unidad de bombeo que permita su caracterización integral desde el punto de vista cinemático y dinámico, así como los siguientes Objetivos Específicos: determinar el grado de libertad del mecanismo de palanca y realizar una descripción del mismo, realizar el análisis cinemático y dinámico del mecanismo de palanca, reflejar mediante gráficas los parámetros desplazamiento, velocidad y aceleración calculadas, así como la gráfica del comportamiento del Torque en el motor durante una revolución de la manivela.

Del mecanismo mostrado en la figura 1, se determinarán los grados de libertad y se realizará una descripción del mismo, se calcularán las velocidades y aceleraciones lineales de los puntos indicados, así como las velocidades y aceleraciones angulares del órgano de trabajo de la unidad de bombeo para, al menos 26 posiciones del mecanismo (360° de giro de la manivela) (Baranov, 1979). El elemento motor tiene una velocidad angular constante, de 120 rev/min, en el sentido mostrado. Las barras tienen una densidad lineal de 2,0 kg/m, y los collarines, una masa de 0,40 kg.



(dimensiones en milímetros)

$AB=100, CB=BF=260, CD=370, FG=360, CH=560$

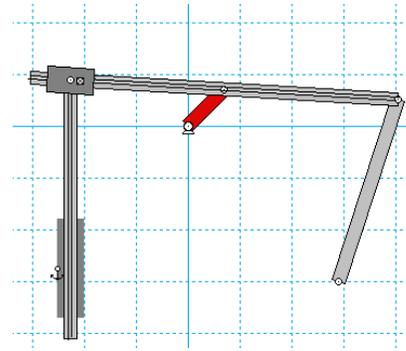


Figura 1. Esquema cinemático y modelo en *Working Model*
Fuente: elaboración propia

En los mecanismos planos, los eslabones tienen los nombres siguientes (Baranov, 1979) (Golubev, 1978) (Myszka, 2012):

Manivela. Es un eslabón del mecanismo que forma con la base el par cinemático de rotación y tiene el movimiento giratorio completo igual a 2π ;

Balancín. Es un eslabón que tiene el movimiento giratorio incompleto (menor a 2π) alrededor de un eje fijo;

Biela. Es un eslabón que forma pares cinemáticos giratorios con eslabones móviles;

Corredera. Es un eslabón del mecanismo que forma el par cinemático de traslación con el otro eslabón móvil o fijo. La corredera larga, en comparación con el otro eslabón con el cual se forma el par cinemático de traslación, a veces se denomina guía;

Colisa. Es un eslabón que realiza el movimiento giratorio alrededor de un eje fijo y forma con otro eslabón móvil el par cinemático de traslación.

Se pasa a elaborar una modelación en *Working Model* para lograr la solución, para ello es preciso introducir la masa en las propiedades de cada uno de los elementos que componen el mecanismo, tabla 1. En el análisis cinemático, la masa y la forma de los eslabones carece de importancia (no se consideran las fuerzas), por lo que se representan esquemáticamente como simples líneas que unen los puntos de enlace, siendo, sin embargo, imprescindible su uso en el análisis dinámico (Oberg,

2016) (Norton, 2020). La unidad de bombeo estudiada, clasifica como una cadena cinemática cerrada ya que todos y cada uno de sus eslabones se unen al menos a otros dos (Golubev, 1978).

Tabla 1. Masa de los elementos que componen el mecanismo

elemento	denominación	masa
1	manivela	$2 \text{ kg/m} \cdot (0,100 \text{ m}) = 0,20 \text{ kg}$
2	biela	$2 \text{ kg/m} \cdot (0,260 \text{ m}) = 0,52 \text{ kg}$
3	balancín	$2 \text{ kg/m} \cdot (0,360 \text{ m}) = 0,72 \text{ kg}$
4	corredera	0,40 kg
5	corredera	0,40 kg

Fuente: elaboración propia

Se está en presencia entonces, de un mecanismo de palancas formado por cinco elementos móviles (manivela (1), biela (2), balancín (3) y dos collarines o correderas (4) y (5), unidos entre sí (y al bastidor) por siete pares cinemáticos inferiores de rotación y traslación en una dirección: A (rotación) entre la manivela y el bastidor, B (rotación) entre la manivela y la biela, D (rotación) entre el balancín y el bastidor, C (rotación) entre la biela y el bastidor, E (rotación) entre el elemento 5 y la corredera y translación entre la biela y la corredera, y G (traslación) entre el elemento 5 y la corredera (fijada al bastidor), conformando una cadena cinemática cerrada.

Teniendo en cuenta lo anterior, la movilidad del mecanismo, se calcula de la forma:

$$W = 3n - 2P_5$$

$$W = 3(5) - 2(7) = 15 - 14 =$$

$$W = 1$$

Donde:

W , movilidad o grado de libertad del mecanismo

n , es el número de elementos móviles y

P_5 , es el número de pares de la quinta clase, es decir, con un grado de libertad.

El mecanismo unidad de bombeo, tiene un grado de libertad, lo cual concuerda con el hecho de que precisa de un solo elemento motor.

En general el sólido rígido en el plano tiene tres grados de libertad. Los pares cinemáticos son restricciones en los sólidos rígidos que reducen los grados de libertad del mecanismo. Si creamos

pares inferiores, son reducidos dos grados de libertad. Similarmente si creamos pares superiores, es reducido un grado de libertad (Golubev, 1978) (Baranov, 1979) (Norton, 2020).

Para llevar el mecanismo a la posición deseada, en este caso 360°, se convierten los grados en radianes y se calcula el tiempo que demora el mecanismo en alcanzar esta posición según (Oberg, 2016):

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{3,14 \cdot 120 \text{ rev/min}}{30}$$

$$\omega = 12,56 \text{ rad/s}$$

$$\frac{180^\circ}{360^\circ} = \frac{\pi}{\theta} = 6,28 \text{ rad}$$

$$t = \frac{\theta}{\omega} = \frac{6,28 \text{ rad}}{12,56 \text{ rad/s}} = 0,5 \text{ s}$$

Con los datos calculados se pasó a realizar la simulación para una vuelta de la manivela (360°). Los parámetros calculados se exportaron para un archivo de texto, abierto posteriormente en Excel para su análisis. Se eliminó una de las columnas repetidas (t) y fue incluida otra que no entrega el software donde se muestra el ángulo para cada intervalo de tiempo ($\theta = t \cdot \omega$). Para este informe se analizan 26 posiciones del mecanismo.

En la tabla 2 se reflejan, los parámetros velocidad y aceleración calculadas (V y Ay), el torque en el motor y la posición del punto G, ubicado en el órgano de trabajo de la unidad de bombeo para el tiempo $t = 0,5 \text{ s}$, calculado anteriormente, que es el tiempo en que tarda la manivela en dar una vuelta de 360°.

Seguidamente en la Figura 2 se muestran los gráficos de aceleración, velocidad y desplazamiento del órgano de trabajo de la unidad de bombeo, elemento con movimiento rectilíneo alternativo como fue apreciado en la simulación en Working Model.

En el gráfico de aceleración se puede apreciar que esta alcanza su valor máximo ($59,28 \text{ m/s}^2$) a los 144° de giro de la manivela (a los 0,20 s según la tabla 2). En esta posición se genera la mayor fuerza en el órgano de trabajo del mecanismo analizado. Los resultados alcanzados demuestran la necesidad del cálculo para diferentes posiciones de la manivela para determinar las fuerzas, así como las dimensiones de las partes a partir de estas, de manera que resistan las condiciones de

carga, teniendo en cuenta que, en este caso de estudio la variación de la aceleración durante el ciclo de trabajo es bastante irregular.

Tabla 2. Parámetros obtenidos en la simulación

No.	t s	θ °	Velocidad del punto G, m/s				Aceleración del punto G, m/s ²				Torque Motor Nm	Posición del punto G, m	
			V _x	V _y	V	V θ	A _x	A _y	A	A θ		x	y
1	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.41	0.00	0.14
2	0.02	14	0.00	-1.03	1.03	0.00	0.00	-30.07	30.07	0.00	-0.99	0.00	0.12
3	0.04	29	0.00	-1.63	1.63	0.00	0.00	-28.84	28.84	0.00	-1.49	0.00	0.10
4	0.06	43	0.00	-2.17	2.17	0.00	0.00	-25.49	25.49	0.00	-1.63	0.00	0.06
5	0.08	58	0.00	-2.63	2.63	0.00	0.00	-19.83	19.83	0.00	-1.20	0.00	0.01
6	0.10	72	0.00	-2.95	2.95	0.00	0.00	-11.41	11.41	0.00	0.06	0.00	-0.05
7	0.12	86	0.00	-3.06	3.06	0.00	0.00	0.71	0.71	0.00	2.33	0.00	-0.11
8	0.14	101	0.00	-2.89	2.89	0.00	0.00	17.46	17.46	0.00	5.39	0.00	-0.17
9	0.16	115	0.00	-2.34	2.34	0.00	0.00	37.68	37.68	0.00	7.70	0.00	-0.22
10	0.18	130	0.00	-1.40	1.40	0.00	0.00	54.90	54.90	0.00	6.56	0.00	-0.26
11	0.20	144	0.00	-0.23	0.23	0.00	0.00	59.28	59.28	0.00	1.69	0.00	-0.27
12	0.22	158	0.00	0.86	0.86	0.00	0.00	47.76	47.76	0.00	-2.80	0.00	-0.27
13	0.24	173	0.00	1.63	1.63	0.00	0.00	28.47	28.47	0.00	-3.96	0.00	-0.24
14	0.26	187	0.00	2.02	2.02	0.00	0.00	11.54	11.54	0.00	-3.01	0.00	-0.20
15	0.28	201	0.00	2.13	2.13	0.00	0.00	1.12	1.12	0.00	-1.93	0.00	-0.16
16	0.30	216	0.00	2.10	2.10	0.00	0.00	-3.65	3.65	0.00	-1.37	0.00	-0.12
17	0.32	230	0.00	2.01	2.01	0.00	0.00	-5.11	5.11	0.00	-1.20	0.00	-0.08
18	0.34	245	0.00	1.91	1.91	0.00	0.00	-5.24	5.24	0.00	-1.17	0.00	-0.04
19	0.36	259	0.00	1.80	1.80	0.00	0.00	-5.37	5.37	0.00	-1.11	0.00	0.00
20	0.38	273	0.00	1.68	1.68	0.00	0.00	-6.39	6.39	0.00	-0.94	0.00	0.03
21	0.40	288	0.00	1.54	1.54	0.00	0.00	-8.80	8.80	0.00	-0.64	0.00	0.06
22	0.42	302	0.00	1.32	1.32	0.00	0.00	-12.66	12.66	0.00	-0.26	0.00	0.09
23	0.44	317	0.00	1.02	1.02	0.00	0.00	-17.48	17.48	0.00	0.09	0.00	0.12

24	0.46	331	0.00	0.62	0.62	0.00	0.00	-22.41	22.41	0.00	0.23	0.00	0.13
25	0.48	345	0.00	0.13	0.13	0.00	0.00	-26.55	26.55	0.00	0.06	0.00	0.14
26	0.50	360	0.00	-0.43	0.43	0.00	0.00	-29.24	29.24	0.00	-0.40	0.00	0.14

Fuente: elaboración propia

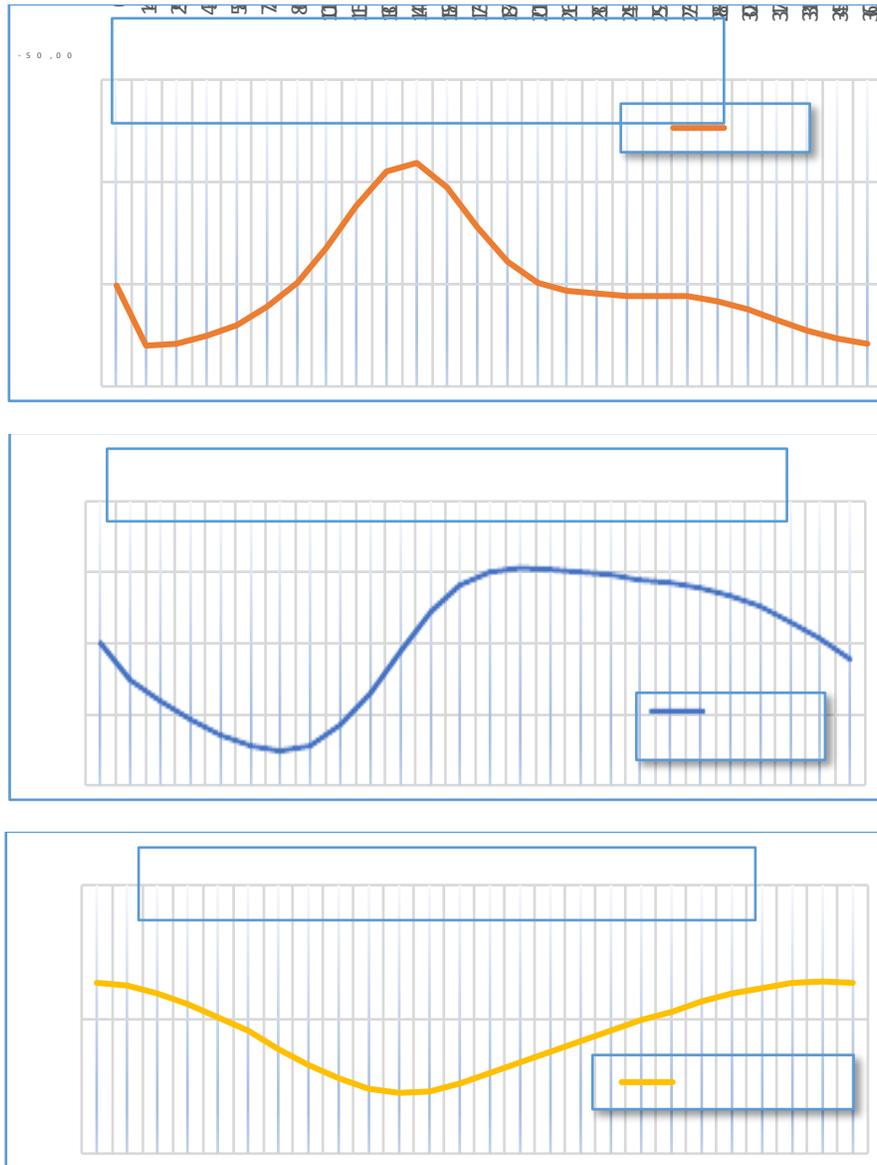


Figura 2. Gráficas de los parámetros cinemáticos determinados

Fuente: elaboración propia

En la variación de la velocidad se advierte que tiene un carácter sinusoidal durante el ciclo, como se observa en el respectivo gráfico, de conjunto con la aceleración se aprecia que durante el ciclo el órgano de trabajo alterna entre movimiento acelerado y desacelerado.

Por otra parte, el gráfico de desplazamiento del extremo del órgano de trabajo para una revolución de la manivela muestra un carácter bastante regular, en el gráfico se percibe que el recorrido del órgano de trabajo desde el punto muerto superior hasta el punto muerto inferior es de 0,44 m.

Posteriormente, en la Figura 3, se muestra el gráfico del torque en el motor para una vuelta de 360° de la manivela.

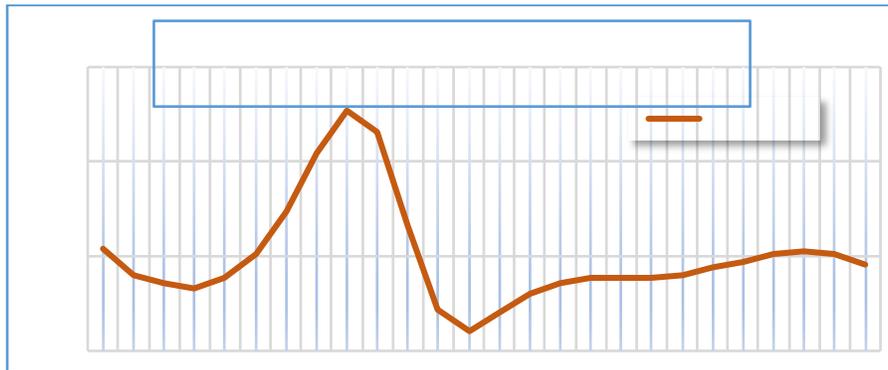


Figura 3. Gráfico del torque en el motor
Fuente: elaboración propia

En el caso del torque en el motor también se observa su variabilidad durante el ciclo de trabajo, siendo su mayor valor de 7,7 Nm que se alcanza en los 115° de giro de la manivela, lo que de conjunto con la variabilidad de la aceleración permite inferir que las partes del mecanismo están sujetas a cargas dinámicas por lo que debe ser considerada la fatiga en su dimensionamiento.

Luego del estudio previsto de la unidad de bombeo, se llegó a la conclusión de que el mecanismo tiene un grado de libertad, lo cual concuerda con el hecho de que precisa de un solo elemento motor, únicamente posee pares cinemáticos de quinta clase, es decir pares con un solo grado de libertad, cinco de rotación y dos de translación, esto es para simplificar la mecánica, la cinemática y el control del mecanismo, como también ocurre en el caso de los manipuladores robóticos (Oberg, 2016). La aceleración máxima en el órgano de trabajo es de $59,28 \text{ m/s}^2$, alcanzada en 0,20 s, (144°), siendo para esta posición que se debe realizar el dimensionamiento del órgano de trabajo, elemento 5 en la figura 1, pues se obtendrá el mayor valor de la fuerza ($F = ma$), lo que justifica la necesidad

de realizar el análisis en varias posiciones de trabajo de los mecanismos (Baranov, 1979). El mecanismo alcanzó un torque máximo en el motor de 7,7 Nm.

Referencias bibliográficas

- Baranov, G. (1979). *Curso de la Teoría de Mecanismos y Máquinas*. Moscú: Editorial MIR.
- Davim, J. P. (Ed.). (2018). *Introduction to Mechanical Engineering*. Cham, Switzerland, Switzerland: Springer.
- Golubev, Y. (1978). *Teoría de máquinas y mecanismos*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación.
- Myszka, D. H. (2012). *Máquinas y Mecanismos* (Cuarta edición ed.). México, DF: Pearson Educación.
- Norton, R. L. (2020). *Design of Machinery: an introduction to the synthesis and analysis of mechanisms and machines* (Sixth edition ed.). New York, NY: Sixth edition.
- Oberg, E. F. (2016). *Machinery's Handbook* (30th ed.). (C. J. McCauley, Ed.) Connecticut: Industrial Press.
- Wickert, J., & Lewis, K. (2015). *An Introduction to Mechanical Engineering* (Fourth Edition ed.). Boston: Cengage Learning.