

ANÁLISIS CINEMÁTICO DE MECANISMOS PLANOS POR EL MÉTODO DE LOS GRAFOS

RESUMEN

En este artículo se presenta una simplificación metodológica para el análisis cinemático de mecanismos formados a partir de grupos de Assur de segunda clase, por el método de los grafos. Se presenta un planteamiento general del método y la solución de un mecanismo específico.

PALABRAS CLAVES: Grafo, Contorno, Análisis cinemático, Grupos de Assur.

ABSTRACT

This paper present a methodological simplification of cinematic analyses of mechanics formed for second type "assur" groups, using the graphs method. It presents a general planning of the method and a specific solution for a specific mechanism.

KEYWORDS: *Graphs, Contour, Cinematic analyses, Assur Groups.*

GABRIEL CALLE T.

Ingeniero Mecánico, Ph.D.
Profesor Asociado
Universidad Tecnológica de Pereira
gcalle@utp.edu.co

ALEXANDER DIAZ A.

Ingeniero Mecánico, Esp.
Profesor Asistente
Universidad Tecnológica de Pereira
alexdiata@utp.edu.co

EDISON HENAO C.

Ingeniero Mecánico, M. Sc.
Profesor Auxiliar.
Universidad Tecnológica de Pereira
edisonhenao@utp.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Existen varios procedimientos gráficos y analíticos para el análisis cinemático de mecanismos planos descritos ampliamente, en los diferentes textos de teoría de mecanismos y maquinas. Basados en la clasificación estructural de los grupos de Assur se pueden plantear soluciones generales para cierto grupo de mecanismos de estructura similar. Teniendo en cuenta que en la representación de mecanismos por medio de grafos, se puede agrupar una familia de mecanismos formados a partir de la síntesis estructural basada en los grupos de Assur, se puede llegar al planteamiento rápido de ecuaciones cinemáticas a partir de un grafo representativo de una familia de mecanismos específica.

En este trabajo se describe el procedimiento para el análisis cinemático de los mecanismos formados por grupos de Assur de segunda clase, con el fin de dar una herramienta que permita sistematizar el análisis de este tipo de mecanismos.

2. CONTORNOS ESTRUCTURALES

Un contorno estructural se forma al seguir, por medio de una línea ininterrumpida los eslabones y pares cinemáticos que conforman un mecanismo, regresando obligatoriamente al punto de partida.

Se considera un contorno como independiente si se diferencia de los otros por lo menos en un eslabón o en un par cinemático. Se considera como número de contornos independientes de un mecanismo el número mínimo de estos en los cuales ya entran todos los pares cinemáticos y eslabones que lo conforman.

3. GRAFOS

Debido a que los mecanismos (cadenas cinemáticas) son un conjunto de eslabones unidos por medio de pares, este conjunto de pares y eslabones puede ser representado en una forma más abstracta denominada *grafo*. En una representación en grafo los vértices representan los eslabones y las aristas los pares cinemáticos. Las aristas pueden ser etiquetadas o coloreadas. Comúnmente el número de movibilidades de un par (arista) se representa por medio de líneas paralelas, tantas como grados de movilidad tenga el par. Por medio de líneas gruesas se muestran las aristas *raíz* que corresponden a los pares cinemáticos que constituyen las entradas del mecanismo.

Isomorfismo de grafos

Dos grafos G_1 y G_2 se dice que son isomórficos si existe una correspondencia uno a uno entre sus vértices y ejes que preserva la incidencia. Por lo tanto poseen: el mismo número de vértices, el mismo número de ejes y el mismo grado para los vértices.

Ecuación de Euler

La ecuación de Euler permite obtener el número de contornos independientes de un mecanismo.

$$L = e - v + 1 \quad (1)$$

Donde:

L es el número de contornos independientes

e es el número de aristas (Pares cinemáticos)

v es el número de vértices (Numero de eslabones)

Nota: Se supone aquí que las cadenas cinemáticas abiertas conforman un contorno independiente.

4. ECUACIONES DE CONTORNO

Posición

Se da por hecho que el análisis de posiciones es conocido es decir se conocen las posiciones angulares de los eslabones, y las coordenadas absolutas de los pares.

Ecuaciones de contorno para las velocidades

En la Figura 1 se muestra una cadena cinemática cerrada monocontorno con una cantidad n de eslabones. La junta A_i ; $i = 1, 2, \dots, n$ es la conexión entre los eslabones (i) y $(i-1)$. El último eslabón n , está conectado al primer eslabón 0 de la cadena. En una cadena cinemática cerrada se puede hacer un recorrido desde el eslabón 0 hasta el eslabón n .

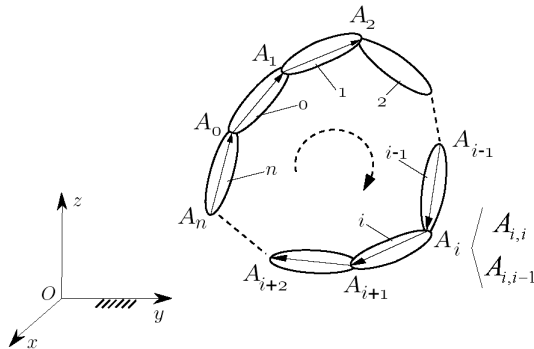


Figura 1. Cadena cinemática monocontorno

En la junta A_i hay dos puntos instantáneamente coincidentes: el punto A_{ii} perteneciente al eslabón (i) , es decir $A_{ii} \in (i)$, y el punto $A_{i,i-1}$ perteneciente al eslabón $(i-1)$, es decir $A_{i,i-1} \in (i-1)$.

Se establece la siguiente relación entre la velocidad $\bar{v}_{A_{ii},i}$ del punto A_{ii} y la velocidad $\bar{v}_{A_{i,i-1},i-1}$ del punto $A_{i,i-1}$

$$\bar{v}_{A_{ii},i} = \bar{v}_{A_{i,i-1},i-1} + \bar{v}_{A_{ii},A_{i,i-1}}^r \quad (2)$$

donde $\bar{v}_{A_{ii},A_{i,i-1}}^r$ es la velocidad relativa de A_{ii} del eslabón (i) , con respecto a $A_{i,i-1}$ perteneciente al eslabón $(i-1)$. Usando la relación de velocidad entre dos partículas pertenecientes al mismo cuerpo (i) podemos escribir

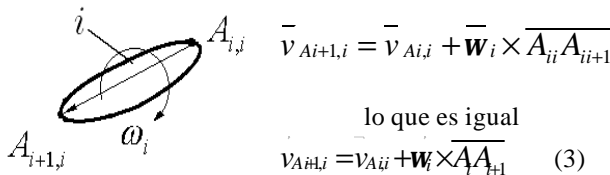


Figura 2. Cuerpo i

Sustituyendo (2) en (3) obtenemos:

$$\bar{v}_{A_{i+1},i} = \bar{v}_{A_{i,i-1}} + \bar{\omega}_i \times \overline{A_{ii}A_{i+1}} + \bar{v}_{A_{ii},A_{i,i-1}}^r \quad (4)$$

Aplicando la ecuación (4) a cada uno de los n eslabones de la cadena cinemática cerrada obtenemos las siguientes expresiones:

$$i=2 \quad \bar{v}_{A_{3,2}} = \bar{v}_{A_{2,1}} + \bar{\omega}_2 \times \overline{A_{2,2}A_{3,2}} + \bar{v}_{A_{22},A_{21}}^r$$

$$i=3 \quad \bar{v}_{A_{4,3}} = \bar{v}_{A_{3,2}} + \bar{\omega}_3 \times \overline{A_{3,3}A_{4,3}} + \bar{v}_{A_{33},A_{32}}^r$$

$$i \quad \bar{n}_{A_{i+1},i} = \bar{n}_{A_{i,i-1}} + \bar{\omega}_i \times \overline{A_{ii}A_{i+1}} + \bar{n}_{A_{ii},A_{i,i-1}}^r \quad (5)$$

$$i=n \quad \bar{n}_{A_{0,n}} = \bar{n}_{A_{n,n-1}} + \bar{\omega}_n \times \overline{A_{nn}A_{0n}} + \bar{n}_{A_{nn},A_{n,n-1}}^r$$

$$i=0 \quad \bar{n}_{A_{1,0}} = \bar{n}_{A_{0,n}} + \bar{\omega}_0 \times \overline{A_{00}A_{1,0}} + \bar{n}_{A_{00},A_{0n}}^r$$

$$i=1 \quad \bar{n}_{A_{2,1}} = \bar{n}_{A_{1,0}} + \bar{\omega}_1 \times \overline{A_{11}A_{2,1}} + \bar{n}_{A_{11},A_{10}}^r$$

Sumando las relaciones (5) se obtiene:

$$\left[\bar{\omega}_1 \times \overline{A_{11}A_{2,1}} + \bar{\omega}_2 \times \overline{A_{22}A_{3,2}} + \dots + \bar{\omega}_i \times \overline{A_{ii}A_{i+1}} + \dots + \bar{\omega}_0 \times \overline{A_{00}A_{1,0}} \right] + \left[\bar{n}_{A_{11},A_{10}}^r + \bar{n}_{A_{22},A_{21}}^r + \dots + \bar{n}_{A_{ii},A_{i,i-1}}^r + \dots + \bar{n}_{A_{00},A_{0n}}^r \right] = 0 \quad (6)$$

El vector $\overline{A_{ii}A_{i+1}}$ puede ser escrito en términos de los vectores de posición de los puntos A_{i+1} y A_i :

$$\overline{OA_i} + \overline{A_iA_{i+1}} = \overline{OA_{i+1}}, \text{ es decir: } \overline{A_iA_{i+1}} = \overline{OA_{i+1}} - \overline{OA_i} \quad (7)$$

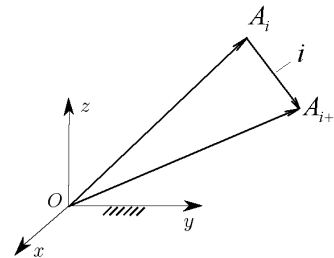


Fig. 3

Teniendo en cuenta (7) la ecuación (6) quedará

$$\bar{\omega}_1 \times (\overline{OA_2} - \overline{OA_1}) + \bar{\omega}_2 \times (\overline{OA_3} - \overline{OA_2}) + \dots + \bar{\omega}_i \times (\overline{OA_{i+1}} - \overline{OA_i}) + \dots + \bar{\omega}_0 \times (\overline{OA_1} - \overline{OA_0}) + \bar{n}_{A_{11},A_{10}}^r + \bar{n}_{A_{22},A_{21}}^r + \dots + \bar{n}_{A_{ii},A_{i,i-1}}^r + \dots + \bar{n}_{A_{00},A_{0n}}^r = 0$$

$$\bar{\omega}_1 \times \overline{OA_2} - \bar{\omega}_1 \times \overline{OA_1} + \bar{\omega}_2 \times \overline{OA_3} - \bar{\omega}_2 \times \overline{OA_2} + \dots + \bar{\omega}_0 \times \overline{OA_1} - \bar{\omega}_0 \times \overline{OA_0} + \bar{n}_{A_{11},A_{10}}^r + \bar{n}_{A_{22},A_{21}}^r + \dots + \bar{n}_{A_{ii},A_{i,i-1}}^r + \dots + \bar{n}_{A_{00},A_{0n}}^r = 0$$

$$\begin{aligned}
 &(\mathbf{w}_0 - \mathbf{w}_1) \times \overline{OA_1} + (\mathbf{w}_1 - \mathbf{w}_2) \times \overline{OA_2} + \dots \\
 &+ (\mathbf{w}_n - \mathbf{w}_0) \times \overline{OA_0} + \mathbf{n}_{A11,A10}^r + \mathbf{n}_{A22,A21}^r + \dots \\
 &+ \mathbf{n}_{Aii,Aii-1}^r + \dots + \mathbf{n}_{A00,A0n}^r = 0
 \end{aligned}$$

Reorganizamos teniendo en cuenta las reglas del producto vectorial

$$\begin{aligned}
 &\overline{OA_1} \times (\mathbf{w}_1 - \mathbf{w}_0) + \overline{OA_2} \times (\mathbf{w}_2 - \mathbf{w}_1) + \dots + \overline{OA_0} \times (\mathbf{w}_0 - \mathbf{w}_n) + \\
 &+ \mathbf{n}_{A11,A10}^r + \mathbf{n}_{A22,A21}^r + \dots + \mathbf{n}_{Aii,Aii-1}^r + \dots + \mathbf{n}_{A00,A0n}^r = \vec{0} \quad (8)
 \end{aligned}$$

Podemos escribir las siguientes relaciones entre la velocidad angular absoluta \mathbf{w}_i del cuerpo i y la velocidad angular relativa $\mathbf{w}_{i,i-1}$ del cuerpo i con respecto al cuerpo ($i-1$)

$$\begin{aligned}
 \mathbf{w}_1 &= \mathbf{w}_0 + \mathbf{w}_{1,0} \\
 \mathbf{w}_2 &= \mathbf{w}_1 + \mathbf{w}_{2,1} \\
 &\dots \dots \dots \\
 \mathbf{w}_i &= \mathbf{w}_{i-1} + \mathbf{w}_{i,i-1} \\
 &\dots \dots \dots \\
 \mathbf{w}_0 &= \mathbf{w}_n + \mathbf{w}_{0,n}
 \end{aligned} \quad (9)$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones (9), la ecuación (8) puede ser rescrita:

$$\begin{aligned}
 &\overline{OA_1} \times \mathbf{w}_{1,0} + \overline{OA_2} \times \mathbf{w}_{2,1} + \dots + \overline{OA_0} \times \mathbf{w}_{0n} \\
 &+ \mathbf{n}_{A11,A10}^r + \mathbf{n}_{A22,A21}^r + \dots + \mathbf{n}_{A00,A0n}^r = 0 \quad (10)
 \end{aligned}$$

y generalizando

$$\sum_i \overline{OA_i} \times \mathbf{w}_{i,i-1} + \sum_i \mathbf{n}_{Aii,Aii-1}^r = 0 \quad (11)$$

Sumando las ecuaciones en (9)

$$\mathbf{w}_{1,0} + \mathbf{w}_{2,1} + \dots + \mathbf{w}_{0n} = 0$$

y generalizando

$$\sum_i \mathbf{w}_{i,i-1} = 0 \quad (12)$$

Las ecuaciones (11) y (12) representan las ecuaciones de velocidad para una cadena cinemática simple cerrada.

Aceleraciones

Se establece la siguiente relación para el movimiento relativo entre dos cuerpos. Sea $a_{Ai,i}$ la aceleración del

punto $A_{i,i}$ perteneciente al eslabón i a_{Aii-1} la aceleración del punto A_{ii-1} perteneciente al eslabón $i-1$.

$$a_{Ai,i} = a_{Aii-1} + a_{Ai,i-1}^r + a_{A,i-1}^c \quad (13)$$

donde $a_{Ai,i}$ y a_{Aii-1} son la aceleración lineal de los puntos $A_{i,i}$ y A_{ii-1} , $a_{Ai,i-1}^r$ es la aceleración relativa del punto $A_{i,i}$ perteneciente al eslabón i , Respecto al punto A_{ii-1} perteneciente al eslabón $i-1$ y la aceleración de coriolis, $a_{Aii-1}^c = 2\mathbf{w}_{i-1} \times \mathbf{v}_{Ai,i-1}^r$.

Efectuando operaciones similares al análisis de velocidades se obtienen las ecuaciones generales.

$$\sum_i a_{i,i-1} \quad (14)$$

$$\begin{aligned}
 &\sum_i r_{A_i} \times a_{i,i-1} + \sum_i a_{i,i-1}^r + \sum_i a_{i,i-1}^c - \\
 &\mathbf{w}_i^2 r_{A_i A_{i+1}} = 0 \quad (15)
 \end{aligned}$$

5. REPRESENTACIÓN POR MEDIO DE GRAFOS DE LOS GRUPOS DE ASSUR DE SEGUNDA CLASE

Un grupo de Assur de segunda clase es una cadena cinemática de grado de libertad cero conformada por 2 eslabones y 3 pares cinemáticos, las cuales son de 5 tipos, GGG, GGD, GDG, DGD, DDG, siendo el par intermedio el par que une los dos eslabones. Suponiendo que con estas cadenas cinemáticas se conforman mecanismos de un grado de libertad, las posibles entradas de movimiento son un eslabón unido al bastidor por medio de un par de rotación G, o un par de deslizamiento D.

El bastidor se enumerara con el numero 0 y el eslabón de entrada con el numero 1 y el par que los une se denotara con A, los eslabones del grupo de segunda clase se enumeraran con los numeros 2 y 3 y los pares se denotaran por B, C, D, de acuerdo al orden como hallan sido unidos al eslabón de entrada.

Posibles combinaciones de mecanismo de primera clase y un grupo de assur de segunda clase.

ESLABON DE ENTRADA	GGG	GGD	GDG	DGD	DDG

Tabla. 1. Posibles combinaciones de grupo de Assur de II clase

Como se observa los posibles mecanismos para estas combinaciones son 14 los cuales se pueden representar con el mismo grafo, solo queda por definir si los pares A,B,C,D, son de giro o deslizamiento respectivamente.

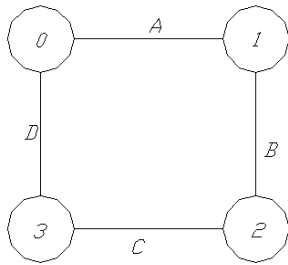


Figura 4. Representación por grafos

Ecuaciones de velocidad

$$w_{10} + w_{21} + w_{32} + w_{03} = 0 \tag{16}$$

$$0A \times w_{10} + 0B \times w_{21} + 0C \times w_{32} + 0D \times w_{03} + n_{A1,0}^r + n_{B2,1}^r + n_{C3,2}^r + n_{D0,3}^r = 0 \tag{17}$$

Ecuaciones de aceleración

$$a_{10} + a_{21} + a_{32} + a_{03} = 0 \tag{18}$$

$$0A \times a_{10} + 0B \times a_{21} + 0C \times a_{32} + 0D \times a_{03} + a_{A1,0}^r + a_{B2,1}^r + a_{C3,2}^r + a_{D0,3}^r + a_{A1,0}^c + a_{B2,1}^c + a_{C3,2}^c + a_{D0,3}^c + w_{10}^2 \cdot AB + w_{20}^2 \cdot BC + w_{03}^2 \cdot CD = 0 \tag{19}$$

Donde

$w_{i,i-1} = 0$, si el par cinemático que une los eslabones i y $i-1$ es de deslizamiento.

$n_{A_{i,i-1}}^r = 0$, si el par cinemático que une los eslabones i y $i-1$ es de giro.

$a_{i,i-1} = 0$, si el par cinemático que une los eslabones i y $i-1$ es de deslizamiento.

$a_{A_{i,i-1}}^r = 0, a_{A_{i,i-1}}^c = 0$, si el par cinemático que une los eslabones i y $i-1$ es de giro.

6. EJEMPLO DE APLICACIÓN

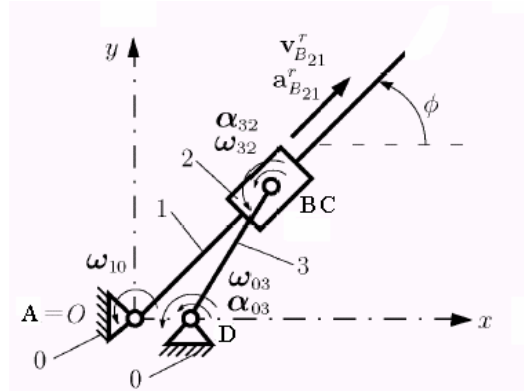


Figura 5. Mecanismo de segunda clase GGD

Analicemos el mecanismo de la figura 5 formado por un eslabón de entrada de giro y un grupo de assure de segunda clase del tipo GGD, el cual por medio del par de deslizamiento se une al eslabón de entrada. Se conocen los siguientes datos: $AD = 0,100 \text{ m}$, $CD = 0,300 \text{ m}$. El Angulo del eslabón de entrada 1 con el eje horizontal es $f_1 = 45^\circ$, se asume el origen del sistema de coordenadas coincidente con A.

Del análisis de posición se tiene: $x_D = AD$, $y_D = 0$, $x_B = x_C = 0,256 \text{ m}$, $y_B = y_C = 0,256 \text{ m}$
 $w_1 = w_{10} = 10,472 \text{ rad / s}$

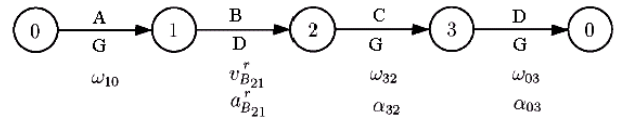


Figura 6. Grafo extendido

Para el análisis de velocidad se escriben las siguientes ecuaciones:

$$w_{10} + w_{32} + w_{03} = 0$$

$$0C \times w_{32} + 0D \times w_{03} + n_{B2,1}^r = 0$$

Efectuando la descomposición vectorial se tiene:

$$w_{10}k + w_{32}k + w_{03}k = 0$$

$$(x_C i + y_C j) \times w_{32}k + (x_D i) \times w_{03}k + (n_{B2,1}^r \cos f) i + (n_{B2,1}^r \sin f) j = 0$$

Efectuando el producto y agrupando los términos de cada componente se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$w_{10} + w_{32} + w_{03} = 0$$

$$y_C \cdot \mathbf{w}_{32} + y_D \cdot \mathbf{w}_{03} + \mathbf{n}_{B2,1}^r \text{Cos}f = 0$$

$$-x_C \cdot \mathbf{w}_{32} - x_D \cdot \mathbf{w}_{03} + \mathbf{n}_{B2,1}^r \text{Sen}f = 0$$

Reemplazando los términos conocidos (\mathbf{w}_{10} , f , x_C , y_C , x_D , y_D) y efectuando las operaciones necesarias se obtienen los valores de:

$$\mathbf{w}_{32} = 2,539 \text{ rad/s}, \quad \mathbf{w}_{03} = -13,011 \text{ rad/s},$$

$$\mathbf{n}_{B2,1}^r = -0,920 \text{ m/s}$$

La velocidad absoluta del eslabón 3 es:

$$\mathbf{w}_{30} = -\mathbf{w}_{03} = 13,011 \text{ rad/s}.$$

La velocidad de C se determina de la siguiente manera:

$$\mathbf{n}_C = \mathbf{n}_D + \mathbf{w}_{30} k \times [(x_C - x_D)i + (y_C - y_D)j]$$

donde $\mathbf{n}_D = 0$, por lo tanto:

$$\mathbf{n}_C = (-3,333i + 2,032j) \text{ m/s}$$

La velocidad del punto B que pertenece al eslabón 1 es:

$$\mathbf{n}_B = \mathbf{n}_A + \mathbf{w}_{10} k \times (x_B i + y_B j)$$

$$\mathbf{n}_B = (-0,651i - 0,651j) \text{ m/s}$$

Para el análisis de aceleración se tienen las siguientes ecuaciones:

$$\mathbf{a}_{32} + \mathbf{a}_{03} = 0$$

$$0C \times \mathbf{a}_{32} + 0D \times \mathbf{a}_{03} + \mathbf{a}_{B2,1}^r + \mathbf{a}_{B2,1}^c + \mathbf{w}_{10}^2 \cdot AB + \mathbf{w}_{03}^2 \cdot CD = 0$$

Efectuando la descomposición vectorial se tiene:

$$\mathbf{a}_{32} k + \mathbf{a}_{03} k = 0$$

$$(x_C i + y_C j) \times \mathbf{a}_{32} k + x_D i \times \mathbf{a}_{03} k + \mathbf{a}_{B2,1}^r \text{Cos}f i + \mathbf{a}_{B2,1}^r \text{Sen}f j + 2 \cdot \mathbf{w}_{10} \times [\mathbf{n}_{B2,1}^r \text{Cos}f i + \mathbf{n}_{B2,1}^r \text{Sen}f j] + \mathbf{w}_{10}^2 \cdot (x_B i + y_B j) + \mathbf{w}_{30}^2 \cdot [(x_C - x_D)i + (y_C - y_D)j] = 0$$

Efectuando el producto y agrupando los términos de cada componente se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\mathbf{a}_{32} + \mathbf{a}_{03} = 0$$

$$y_C \cdot \mathbf{a}_{32} + y_D \cdot \mathbf{a}_{03} + \mathbf{a}_{B2,1}^r \text{Cos}f - 2 \cdot \mathbf{w}_{10} \cdot \mathbf{n}_{B2,1}^r \text{Sen}f - \mathbf{w}_{10}^2 \cdot x_B - \mathbf{w}_{30}^2 \cdot (x_C - x_D) = 0$$

$$x_C \cdot \mathbf{a}_{32} + x_D \cdot \mathbf{a}_{03} + \mathbf{a}_{B2,1}^r \text{Sen}f - 2 \cdot \mathbf{w}_{10} \cdot \mathbf{n}_{B2,1}^r \text{Cos}f - \mathbf{w}_{10}^2 \cdot y_B - \mathbf{w}_{30}^2 \cdot (y_C - y_D) = 0$$

Reemplazando los términos conocidos (\mathbf{w}_{10} , \mathbf{w}_{30} , $\mathbf{n}_{B2,1}^r$, f , x_C , y_C , x_D , y_D) y efectuando las operaciones necesarias se obtienen los valores de:

$$\mathbf{a}_{32} = -25,032 \text{ rad/s}^2, \quad \mathbf{a}_{03} = 25,032 \text{ rad/s}^2 \quad \text{y}$$

$$\mathbf{a}_{B2,1}^r = -7,865 \text{ m/s}^2$$

La aceleración absoluta del eslabón 3 es:

$$\mathbf{a}_{30} = -\mathbf{a}_{03} = -25,032 \text{ rad/s}^2$$

La aceleración de C se determina de la siguiente manera:

$$\mathbf{a}_C = \mathbf{a}_D + \mathbf{a}_{30} k \times [(x_C - x_D)i + (y_C - y_D)j]$$

donde $\mathbf{a}_D = 0$, por lo tanto:

$$\mathbf{a}_C = (-20,026i - 47,277j) \text{ m/s}^2$$

7. CONCLUSIONES

En este artículo se ha propuesto un método para el análisis cinemático de mecanismos planos el cual combina la clasificación estructural de los grupos de assur y la representación por medio de grafos. Este método presenta una viabilidad de análisis que permite el planteamiento general y facilita la sistematización de los grupos de assur y plantea un método general de solución que puede ser de gran apoyo en el proceso de enseñanza aprendizaje.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] CALLE G., DÍAZ A., QUINTERO. Curso de Teoría de Mecanismos y Máquinas. Notas de clase. UTP. 2004. <http://www.geocities.com/mecanautomat>.
- [2] ARTOBOLEVSKY I.I. Teoría de Mecanismos y Máquinas. Moscú. Nauka, 1988 -639 pag.
- [3] MARGHITU D.B. Analytical Elements of Mechanisms Auburn University, Alabama, 2001 - 286
- [4] SMELYAGUIN A.I. Estructura de Mecanismos y Máquinas. Novosibirsk. NGTU, 2001 - 286 pag.
- [5] TSAI L.W. Mechanism Design: Enumeration of Kinematic Structures According to Function, CRC Press 2000 - 328 pag.