

Diseño y producción de un generador físico de números aleatorios aprovechando la entropía de un sistema eólico.

Luis Huatay S.⁽¹⁾ Cristian Cristóbal B.⁽²⁾

⁽¹⁾ Estudiante de 3° ciclo de la carrera de ING. Software, UTP

⁽²⁾ Estudiante de 3° ciclo de la carrera de ING. Sistemas, UTP

Resumen

En este proyecto se realiza el diseño y producción de un mecanismo *Theo Jansen* generador de números aleatorios que emplea la energía cinética de un sistema eólico para aprovechar la entropía del mismo. El objetivo es crear un generador físico de números aleatorios utilizando conceptos básicos de mecánica clásica. Los resultados obtenidos pretenden demostrar la viabilidad de este enfoque y su aplicación en la generación de números aleatorios con diferentes usos en ingeniería y más específicamente, seguridad informática. El proyecto se desarrolla en el contexto de la asignatura Mecánica Clásica, con el fin de aplicar los conocimientos adquiridos en clase a un caso práctico.

Palabras clave: *Strandbeest - Theo Jansen - Entropía - Aleatoriedad - Seguridad - Mecánica Clásica*

1. Introducción

La generación de números aleatorios es un aspecto fundamental en diversas áreas de la ingeniería y la informática, especialmente en la en la ciberseguridad, estos números ayudan a poder crear claves seguras para cifrado, autenticación y otros procesos críticos. Sin embargo, la generación de números aleatorios a menudo se basa en algoritmos que pueden ser predecibles o insuficientemente aleatorios, lo que plantea riesgos de seguridad. Según *Herrero y Escartín (2017)* Si hay un campo en el que sea necesaria la creación y uso de números aleatorios ese es, sin duda, la computación. Aparte de las aplicaciones que, por su naturaleza, requieren el uso de este tipo de números, como pueden ser los casinos online, gran parte de la criptografía moderna se apoya en los números aleatorios para garantizar su seguridad. [1]

Es en ese sentido que el presente proyecto busca explorar una alternativa innovadora para la generación de números aleatorios, aprovechando la entropía de un sistema que usa el viento como energía para el movimiento. La idea es diseñar y construir un mecanismo inspirado en las obras del artista e ingeniero Theo Jansen, conocido por sus estructuras cinéticas que caminan utilizando el viento como fuente de energía. [2] que pueda aprovechar la energía cinética generada por el viento para crear un sistema que produzca números aleatorios cada que el mecanismo se mueva y deje de hacerlo, utilizando de esta forma la entropía del sistema para garantizar la aleatoriedad de los números generados. [3]

1.1. Descripción

La generación de números aleatorios es un problema complejo que ha sido abordado de diversas maneras a lo largo de la historia. En el contexto de la informática, los números aleatorios se han formado mediante algoritmos que, aunque eficientes, pueden carecer de la verdadera aleatoriedad necesaria para aplicaciones críticas. Históricamente, según *Herrera (2000)* Antes del advenimiento de las computadoras, los números aleatorios eran generados por dispositivos físicos. En 1939, Kendall y Babington-Smith publicaron 100.000 dígitos aleatorios obtenidos con un disco giratorio iluminado con una lámpara relámpago. En 1955, la Rand Corporation publicó un millón de dígitos producidos controlando una fuente de pulsos de frecuencia aleatoria (mecanismo electrónico); éstos se encuentran disponibles en cintas magnéticas de la Rand. [4]

Actualmente, la generación de números aleatorios se basa en algoritmos que utilizan procesos deterministas para producir secuencias de números que parecen aleatorios, estos números son llamados también *números pseudoaleatorios*.

Sobre el impacto socioeconómico de la generación de números aleatorios, es importante destacar que la seguridad informática es un aspecto crítico en la sociedad actual. La protección de datos personales, transacciones financieras y comunicaciones confidenciales depende en gran medida de la calidad de los números aleatorios utilizados en los sistemas de cifrado. Un generador de números aleatorios confiable puede mejorar significativamente la seguridad de estos sistemas, reduciendo el riesgo de ataques cibernéticos y garantizando la privacidad de los usuarios.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es diseñar y construir un mecanismo *Theo Jansen* que aproveche la energía cinética del viento para generar números aleatorios. Esta se considera una idea innovadora que combina principios de mecánica clásica con la generación de números aleatorios y que a nivel personal de los autores es un reto emocionante que implica aplicar los conocimientos adquiridos durante el curso del cual se desarrolla este proyecto.

Por otro lado, se busca demostrar la viabilidad teórica de este enfoque y su aplicación en la generación de números aleatorios con diferentes y generales usos. Para lograr esto, se llevará a cabo un diseño cuidadoso del mecanismo, seguido de la construcción, prueba del mismo y de los números generados.

1.3. Alcances y limitaciones

Los mecanismos *Theo Jansen* son estructuras que en principio están diseñadas para caminar utilizando el viento como fuente de energía. No pretenden ocupar mucho espacio ni ser innecesariamente complejos, sino que buscan ser eficientes y funcionales. En este proyecto. En lo que respecta a lo económico, se busca utilizar materiales accesibles y de bajo costo para la construcción del mecanismo, lo que permitirá que el proyecto sea replicable. En ese sentido se pueden considerar algunos alcances y limitaciones para el presente proyecto:

■ Alcances:

- Diseño y construcción de un mecanismo *Theo Jansen* que aproveche la energía cinética del viento.
- Generación de números aleatorios utilizando la entropía del sistema eólico.
- Aplicación de principios de mecánica clásica en el diseño y funcionamiento del mecanismo.

■ Limitaciones:

- Dependencia de las condiciones climáticas para el funcionamiento del mecanismo.
- Posible variabilidad en la calidad de los números aleatorios generados debido a factores externos.
- Dificultades en la calibración y ajuste del mecanismo para garantizar un funcionamiento óptimo.
- Limitaciones en la precisión y repetibilidad de los números generados por el mecanismo.

2. Fundamentos Físicos

Los fundamentos físicos del proyecto se centran los que intervienen en el diseño y funcionamiento del mecanismo *Theo Jansen*, estos fundamentos incluyen principios de mecánica clásica como cinemática y dinámica, que son esenciales para comprender cómo el mecanismo puede aprovechar la energía cinética del viento para moverse y con esto, generar números aleatorios. A continuación, se describen los conceptos clave que sustentan el proyecto:

- **Cinemática:** La cinemática es la rama de la mecánica que estudia el movimiento de los cuerpos sin considerar las fuerzas que lo producen. En el caso del mecanismo *Theo Jansen*, la cinemática se aplica para analizar el movimiento rotacional que se traduce en traslacional. Se utilizan conceptos como posición, velocidad y aceleración para describir el movimiento del mecanismo en función del tiempo.

Algunas de las expresiones matemáticas utilizadas en la cinemática incluyen:

Ecuación de la posición:

$$x(t) = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (1)$$

Donde:

$x(t)$: Posición en el tiempo t
 x_0 : Posición inicial
 v_0 : Velocidad inicial
 a : Aceleración

Razón de cambio de la posición o velocidad:

$$v(t) = v_0 + a t \quad (2)$$

Donde:

$v(t)$: Velocidad en el tiempo t
 v_0 : Velocidad inicial
 a : Aceleración

Razón de cambio de la velocidad o aceleración:

$$a(t) = \frac{dv}{dt} \quad (3)$$

Donde:

$a(t)$: Aceleración en el tiempo t

- **Dinámica:** La dinámica es la rama de la mecánica que estudia las fuerzas y sus efectos sobre el movimiento de los cuerpos. En este proyecto, la dinámica se aplica para comprender cómo las fuerzas del viento afectan el movimiento del mecanismo y cómo estas fuerzas pueden ser aprovechadas para generar números aleatorios. Se utilizan conceptos como fuerza, masa y aceleración para analizar el comportamiento del mecanismo bajo la influencia del viento.

La expresión fundamental de la dinámica es la segunda ley de Newton, que establece la relación entre la fuerza neta aplicada a un cuerpo, su masa y su aceleración:

Segunda ley de Newton:

$$\vec{F} = m \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t} = m \vec{a} \quad (4)$$

Donde:

\vec{F} : Fuerza neta aplicada al cuerpo
 m : Masa del cuerpo
 $\Delta \vec{V}$: Cambio en la velocidad del cuerpo
 Δt : Intervalo de tiempo durante el cual se aplica la fuerza
 \vec{a} : Aceleración del cuerpo

- **Energía cinética:** La energía cinética es la energía asociada al movimiento de un cuerpo. En el mecanismo *Theo Jansen*, la energía cinética del viento se convierte en movimiento mecánico, lo que permite que el mecanismo se desplace y genere números aleatorios. La energía cinética se calcula utilizando la fórmula:

Energía cinética:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (5)$$

Donde:

E_k : Energía cinética del cuerpo
 m : Masa del cuerpo
 v : Velocidad del cuerpo

- **Entropía:** La entropía es una medida del desorden o aleatoriedad en un sistema. En el contexto de este proyecto, la entropía se refiere a la variabilidad en el movimiento del mecanismo lo que causará intervalos de movimiento y detención, lo que a su vez generará números aleatorios. La entropía se relaciona con la cantidad de información que se puede obtener de un sistema y es fundamental para garantizar la aleatoriedad de los números generados.

Entropía:

$$S = - \sum_{i=1}^n p_i \log(p_i) \quad (6)$$

Donde:

S : Entropía del sistema
 p_i : Probabilidad de ocurrencia del evento i
 n : Número total de eventos posibles

- **Movimiento circular uniforme:** El movimiento circular uniforme es un tipo de movimiento en el que un objeto se desplaza a lo largo de una trayectoria circular con una velocidad constante. En el caso del mecanismo *Theo Jansen*, el movimiento circular uniforme se utiliza para generar el movimiento rotacional necesario para el funcionamiento del mecanismo. Este tipo de movimiento se caracteriza por una velocidad angular constante y una aceleración centrípeta que mantiene al objeto en su trayectoria circular.

Así mismo, para nuestro mecanismo, este utilizará una ruleta de números aleatorios que se detendrá en un número al azar cada vez que el mecanismo se detenga. La ruleta estará dividida en segmentos numerados, y la probabilidad de que el mecanismo se detenga en un número específico dependerá de la distribución de los segmentos y de la entropía del viento.

Algunas de las expresiones matemáticas utilizadas en el movimiento circular uniforme incluyen:

- **Velocidad angular:**

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (7)$$

Donde:

ω : Velocidad angular del objeto
 $\Delta\theta$: Cambio en el ángulo de posición del objeto
 Δt : Intervalo de tiempo durante el cual ocurre el cambio

- **Velocidad tangencial:**

$$v = r\omega \quad (8)$$

Donde:

v : Velocidad tangencial del objeto
 r : Radio de la trayectoria circular
 ω : Velocidad angular del objeto

- **Frecuencia:**

$$f = \frac{1}{T} \quad (9)$$

Donde:

f : Frecuencia del movimiento circular
 T : Período del movimiento circular (tiempo para completar una vuelta)

3. Metodología

El proyecto se lleva a cabo siguiendo varias etapas clave que incluyen la investigación, el diseño, la construcción y la prueba del mecanismo. Cada etapa se desarrolla de manera sistemática para garantizar que se cumplan los objetivos del proyecto y se obtengan resultados significativos.

Concluida la etapa de investigación, a continuación se detallan las siguientes etapas de la metodología empleada:

3.1. Diseño del mecanismo

El diseño del mecanismo *Theo Jansen* se basa en los principios de la mecánica clásica y la cinética. Las partes importantes del mecanismo incluyen:

- **Ejes y engranajes:** Estos componentes son fundamentales para transmitir el movimiento del viento al mecanismo. Los ejes permiten que las partes móviles giren, mientras que los engranajes ayudan a convertir el movimiento rotacional en movimiento lineal, lo que es esencial para el funcionamiento del mecanismo.
- **Estructura de soporte:** La estructura del mecanismo debe ser lo suficientemente robusta para soportar las fuerzas generadas por el viento y el movimiento del mecanismo y al mismo tiempo ser lo suficientemente ligera para permitir que el viento la mueva. Esto se logra mediante el uso de materiales adecuados y un diseño estructural eficiente.
- **Articulaciones:** Se refiere a las conexiones entre las diferentes partes del mecanismo que permiten el movimiento relativo entre ellas. Estas articulaciones son cruciales para garantizar que el mecanismo funcione de manera fluida y eficiente.

Una de las partes fundamentales, luego de diseñar estos componentes, son las patas del mecanismo, que permiten que se mueva y camine de manera eficiente y fluida, según el creador del mecanismo, Theo Jansen. Este simula el movimiento de la pata de un animal y ha sido perfeccionado durante los últimos 10 años mediante un algoritmo evolutivo. Según *Bustamante T. (2016)*, el criterio principal para el desarrollo de estas patas es el rendimiento de los elementos en la tarea encomendada, utilizando los errores y mejoras de las evoluciones para optimizar el diseño en cada iteración. [6]

Este algoritmo evolutivo entrega al final de sus múltiples iteraciones las medidas de las patas del mecanismo, lo que su creador denomina *Los números sagrados*

Cuadro 1: Valores asignados a cada letra

Letra	Valor	Letra	Valor
a	38.0	g	36.7
b	41.5	h	65.7
c	39.3	i	49.0
d	40.1	j	50.0
e	55.8	k	61.9
f	39.4	l	7.8
m = 15.0			

Estos valores hacen posible un movimiento fluido y altamente eficiente del mecanismo, permitiendo que se mueva con la energía cinética del viento.

De acuerdo a esta lista es necesario poder escalar las medidas de las patas del mecanismo para que se ajusten a las dimensiones del proyecto. Para ello, se establece un factor de escala que es la relación entre las dimensiones del mecanismo y las dimensiones reales de las patas.

Como medida base se toma la longitud más grande **h** que pretende ser de 65.7 cm pero se escalará a 21.5 cm de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\text{Factor de escala} = \frac{\text{Longitud deseada}}{\text{Longitud original}} = \frac{21,5}{65,7} \approx 0,33 \quad (10)$$

Es entonces de acuerdo a este factor de escala que se multiplicarán las medidas de las patas del mecanismo para obtener las dimensiones reales de las patas del mecanismo obteniendo así las longitudes entre ejes de rotación de las articulaciones que se usarán para el proyecto. A continuación se muestran las medidas escaladas de las patas del mecanismo *Theo Jansen* y al costado el margen de medio centímetro en cada extremo que asegura espacio para las uniones de las patas con los ejes de rotación:

Cuadro 2: Longitud entre ejes de rotación

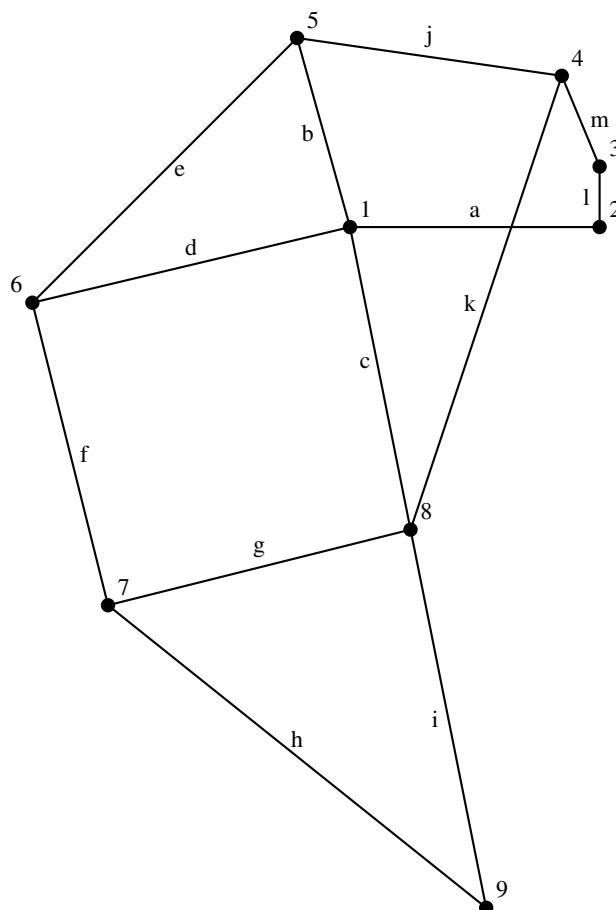
Letra	Valor	Letra	Valor
a	12.5	g	12.1
b	13.7	h	21.7
c	13.0	i	16.2
d	13.2	j	16.5
e	18.4	k	20.4
f	13.0	l	2.6
m = 5			

Cuadro 3: Longitud completa con margen

Letra	Valor	Letra	Valor
a	13.5	g	13.1
b	14.7	h	22.7
c	14.0	i	17.2
d	14.2	j	17.5
e	19.4	k	21.4
f	14.0	l	3.6
m = 6			

Una vez encontradas estas medidas se pretenden ensamblar de la siguiente manera:

Figura 1: Diagrama de las patas del mecanismo *Theo Jansen* con los números sagrados



3.2. Materiales

Dentro del marco del proyecto, se emplean diversos materiales para la construcción del mecanismo *Theo Jansen*. Estos materiales son seleccionados fueron esocgidos por su durabilidad, flexibilidad y ligeresa, lo que permite que el mecanismo funcione de manera eficiente y efectiva. Los materiales utilizados incluyen:

- **Sorbetes de plástico:** Estos sorbetes son utilizados para las patas del mecanismo, ya que son ligeros y flexibles, lo que permite que el mecanismo se mueva de manera eficiente. Además, los sorbetes son fáciles de conseguir y económicos, lo que los convierte en una opción ideal. Además de ser increíblemente resistentes ante la presión y torsión.
- **Hilo de coser o pavilo:** Este hilo se utiliza para unir las diferentes partes de la pata, hacen posible rotar a la articulación de manera que no es afectada por la fricción.
- **Palillos de manera:** Es importante fijar las patas a un eje central, para lo cual se utilizan palillos de madera. Estos palillos son resistentes y permiten unir las patas mediante el cigüeñal del mecanismo que convertirá el movimiento rotacional en movimiento lineal.
- **Palillos de fosforos:** Estos palillos se utilizan para la misma función que el hilo.
- **Varillas de aluminio:** Estas varillas se utilizarán para sujetar los ejes de las patas, esto es importante porque existen partes que no se mueven.
- **Silicona:** Una manera fácil de poder tener una sujetar los palillos de fósforos y además de colocar una especie de pezuña en las patas del mecanismo para que pueda caminar sobre superficies sin complicación.

A continuación se muestra una imagen de los materiales que se utilizarán en el proyecto:



Figura 2: Materiales utilizados en el proyecto

3.3. Maqueta

Se desarrolló la maqueta del mecanismo *Theo Jansen* utilizando los materiales mencionados anteriormente. La maqueta se construyó siguiendo el diseño de las patas y la estructura del mecanismo, asegurando que todas las partes estuvieran correctamente ensambladas y unidas.

Como parte del prototipo se desarrolló una pata del mecanismo para probar su funcionamiento y asegurarse de que se moviera que era de manera preliminar lo que se buscaba.

La pata se ensambló utilizando palillos, tanto de brocheta como de doctor, este se incrustó en una plataforma plana y se probó el cigüeñal, a continuación se muestra una imagen de la pata ensamblada:

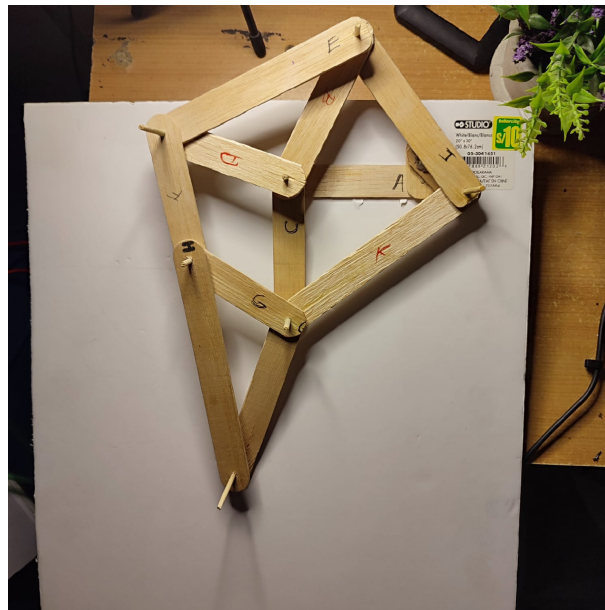


Figura 3: Pata del mecanismo *Theo Jansen* ensamblada

Para la visualización puede dar click aquí: [Pata del mecanismo *Theo Jansen* ensamblada](#)

Referencias

- [1] Herrero, M. and Escartín, J. C. G. (2017). *La física de los números aleatorios*. Revista española de física, 31(2), 23–26.
- [2] Nansai, S., Elara, M. R., & Iwase, M. (2013). Dynamic Analysis and Modeling of Jansen Mechanism. *Procedia Engineering*, 64, 1562–1571. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2013.09.238>
- [3] Pacheco Hernández, P. R., Salini Calderón, G. A., & Mera Garrido, E. M. (2021). *Entropía y neguentropía: Una aproximación al proceso de difusión de contaminantes y su sostenibilidad*. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 37, 167–185. <https://doi.org/10.20937/RICA.53688>
- [4] Herrera, A. M. M. (2000). Números aleatorios: Historia, teoría y aplicaciones. *Ingeniería y Desarrollo*, (8), 49–69.
- [5] *Introducción a la seguridad informática y el análisis de vulnerabilidades*. Recuperado de https://play.google.com/books/reader?id=5Z9yDwAAQBAJ&pg=GBS.PA16&hl=es_419
- [6] Téllez, J. (2016). Diseño de mecanismo de locomoción andante con cambio de dirección. *Navarra*, junio.
- [7] Olga del Orden Olasagasti. *Ejercicios Resueltos De Inferencia Estadística Y Del Modelo Lineal Simple*. Recuperado de https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=pr5TEQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR2&dq=Ejercicios+resueltos+de+inferencia+estad%C3%ADstica+y+del+modelo+lineal+simple&ots=T42RpsBjJu&sig=jAkyfuPBzLlv0o3tHDlm0S5LbGI&redir_esc=y#v=onepage&q=Ejercicios%20resueltos%20de%20inferencia%20estad%C3%ADstica%20y%20del%20modelo%20lineal%20simple&f=false.
- [8] Gil Izquierdo, M., Gonzáles Martín, A. I., & Jano Salagre, M. D. (2014). *Ejercicios de estadística teórica: probabilidad e Inferencia (2a ed.)*. Editorial Universidad Autónoma de Madrid.
- [9] Díaz Rodríguez, Martín. *Estadística inferencial aplicada: Segunda edición revisada y aumentada*. Recuperado de https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=IHCHEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Estad%C3%ADstica+inferencial+aplicada++Autor:+D%C3%ADaz+Rodr%C3%ADguez,+Mart%C3%ADn++Autor&ots=Sf8Tno6kLg&sig=u1xdyAJline4t90FJ5YAAxxWKng&redir_esc=y#v=onepage&q=Estad%C3%ADstica%20inferencial%20aplicada%20%20Autor%3A%20D%C3%ADaz%20Rodr%C3%ADguez%2C%20Mart%C3%ADn%20-%20Autor&f=false.
- [10] Llinás Solano, Humberto. *Estadística inferencial*. Recuperado de https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=KZYQEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Estad%C3%ADstica+Inferencial++Autor:+Llin%C3%A1s+Solano,+Humberto&ots=Xpi0wWw3lo&sig=DWM-pZnBeIOjGyyL5sBk_s_LWBQ&redir_esc=y#v=onepage&q=Estad%C3%ADstica%20Inferencial%20%20Autor%3A%20Llin%C3%A1s%20Solano%2C%20Humberto&f=false.
- [11] Gómez Villegas, Miguel Ángel. *Inferencia estadística*. Recuperado de https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=Y0u0DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR9&dq=Miguel+%C3%81ngel+G%C3%B3mez+Villegas+ESTAD%C3%8DSITICA+INFERENCIAL&ots=KG2bqmMDNd&sig=xguJ0xmXHDguzSQsmn17Gy-SlNA&redir_esc=y#v=onepage&q=Miguel%20%C3%81ngel%20G%C3%B3mez%20Villegas%20ESTAD%C3%8DSITICA%20INFERENCIAL&f=false.