



Research Paper

Comparación de Simulación en ATPDraw y Análisis SEL-411L de falla utilizando TWS

Ramón Ruelas Tánori^{1*}, Juan Pablo García Cantón², Rosalinda García Cantón³,
Lilian Karina Santiesteban Torres⁴, Emmanuel Morales Chávez⁵, José Socorro
Morales Aguilar⁶, Felipe Pasillas Enríquez⁷

¹⁻² Departamento de Eléctrica-Electrónica, Instituto Tecnológico de Hermosillo

³⁻⁴ Departamento de Ciencias Económico Administrativo, Instituto Tecnológico de Delicias

⁵⁻⁶ Departamento de Ingeniería Industrial, Instituto Tecnológico de Delicias

⁷ Departamento de Ingeniería Industrial, Instituto Tecnológico de Ciudad Jiménez

¹⁻⁷ Tecnológico Nacional de México

RESUMEN: En la presente investigación se documenta la experiencia y los resultados de simulación de una falla por descarga atmosférica en una línea de transmisión aérea de 230kV analizada a través de las señales de onda viajera (Traveling Wave Signal, TWS) utilizando el software ATPDraw [3], Adicionalmente se realiza la comparación de resultados utilizando el registro de falla de un relevador de distancia marca SEL, modelo SEL-411L [1], antes y durante el su proceso de puesta en servicio para evaluar el principio de TWS. Posteriormente, se analiza un evento ocurrido días después de la puesta en servicio realizando el ajuste y sintonización del caso base de simulación, de acuerdo con las distancias de falla reportadas por los relevadores de protección de ambos extremos. El desarrollo de la presente investigación se sustenta con la reproducción de mediciones a través de simulaciones en ATPdraw y realizando una comparación de los resultados con los registros de falla de los relevadores de protección. Una vez realizado el estudio y comparación de los resultados obtenidos ante la presencia de falla y analizando las señales TWS correspondientes, fue posible el recomendar el uso de relevadores con este principio de operación en líneas de transmisión aéreas de gran distancia, o bien el líneas donde su difícil acceso es complicado y por lo tanto retarda la atención y corrección de los aislamientos dañados, la discusión es sobre la posibilidad de hacer uso generalizado derivado de la precisión en la localización de falla con TWS, en lugar de algoritmos de medición de impedancia, los cuales se ven afectados por errores de medición, compensación reactiva, etc.

PALABRAS CLAVE: TWS, Alternative Transient Program ATPdraw, SEL-411L

Received 07 Oct., 2026; Revised 16 Oct., 2026; Accepted 18 Oct., 2026 © The author(s) 2026.

Published with open access at www.questjournals.org

I. INTRODUCCIÓN

AL poner en servicio o modernizar los esquemas de protección de líneas de transmisión de la Red Nacional Transmisión, es importante considerar el habilitar equipos basados con el algoritmos de TWS para la localización precisa de la distancia a la falla, esta características de los nuevos esquemas de protección mejoran las condiciones de ubicar el punto de falla, simplificando con ello una búsqueda exhaustiva las cuales además de consumir un tiempo valioso para efectuar las reparaciones correspondientes, también pueden generar costos excesivos de atención. Cabe señalar que originalmente se consideró probar equipos con este algoritmo en una línea de transmisión que opera en 230 kV, con alta incidencia de salida de línea, causadas por descargas atmosféricas en la Zona Serrana en el Noroeste del Sistema Eléctrico Nacional [2]. Ver figura. 1.

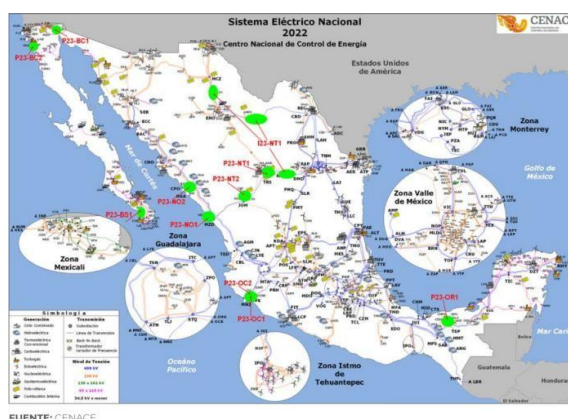


Figura.1. Diagrama del Sistema Eléctrico Nacional

Una vez seleccionada el circuito y escenario para instalar la pareja de relevadores de protección para las pruebas del algoritmo TWS, se procedió a elaborar el caso base en el software de simulación ATPDraw [4]. Realizando un ensayo de pruebas de simulación con falla a la mitad de línea. Sin embargo, para fines de comparación se documentan los resultados para una falla real, de la cual se obtuvieron los registros de falla de ambos extremos y los cuales se realiza su procesamiento, análisis y comparación con los resultados de la simulación del caso base, ahora sintonizado al punto de falla reportado por los relevadores de protección SEL-411L. En la figura 2, se observan los parámetros del impulso de rayo utilizado durante el transcurso de la presente investigación.

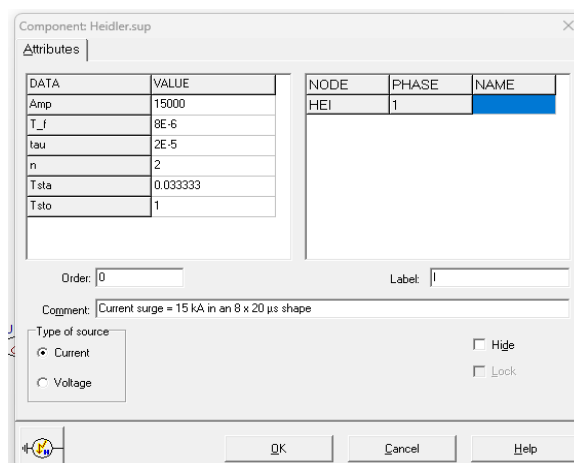


Figura 2. Objeto Heidler de 15kA de 8x20μs

II. ELABORACIÓN CASO BASE ATPDRAW.

El caso base se elabora considerando una línea de transmisión aérea con tres conductores principales 900 ACSR y dos hilos de guarda típicos 7No8, con una disposición horizontal, y con una longitud de 102.7 km. en la figura 3, se representa la disposición geométrica de la línea de transmisión y escenario de este estudio e investigación.

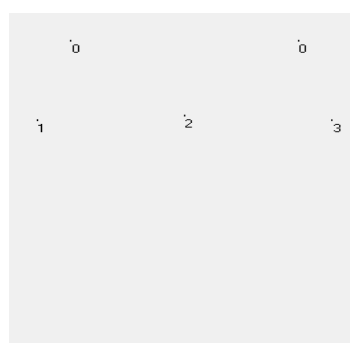


Figura 3. Disposición Geométrica

Mientras que en la figura 4, se muestran los datos de entrada dentro del objeto LCC, de ATPDraw para modelar la línea de transmisión, con tres conductores de fase ACSR 900, así como de los dos hilos de guarda 7No8, y las distancias en metros entre conductores e hilos de guarda.

	Ph.no.	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid
#		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]
1	1	0.492	1.4755	0.0634	0	21.23	11
2	2	0.492	1.4755	0.0634	6.5	21.63	11.3
3	3	0.492	1.4755	0.0634	13	21.23	11
4	0	0	0.476	1.544	1.5	26.32	16
5	0	0	0.476	1.544	11.5	26.32	16

Figura 4. Datos de entrada para el modelo de línea aérea

III. MODELO DEL IMPULSO DE RAYO.

El objeto para simular el impulso de rayo es el objeto Heidler (ver figura 6), con una amplitud de 15 kA y con un frente de $8 \times 20 \mu s$ mismo que se documenta en la figura 2, y del cual sus atributos se muestran en la figura 5.

```

Name : HEIDLER - Surge function. Heidler type. TYPE 15.
Card : SOURCE
Data : U/I= 0: Voltage source.
      -1: Current source.
      Amp= Multiplikative number in [A] or [V] of the function.
            Does not represent peak value of surge.
      T_f= The front duration in [sec]. Interval between t=0 to
            the time of the function peak.
      tau= The stroke duration in [sec]. Interval between t=0 and
            the point on the tail where the function amplitude has
            fallen to 37% of its peak value.
      n= Factor influencing the rate of rise of the function.
          Increased n increases the maximum steepness.
      Tsta= Starting time in [sec]. Source value zero for T<Tsta.
      Tsto= Ending time in [sec]. Source value zero for T>Tsto.
Node : HEI= Positive node of exponential surge function.
      Negative node is grounded.
      = Amp * (t/T_f)^n / (1+(t/T_f)^n) * exp(t/tau)
RuleBook: VII.C.5
    
```

Figura 5. Descripción de los atributos del modelo HEIDLER

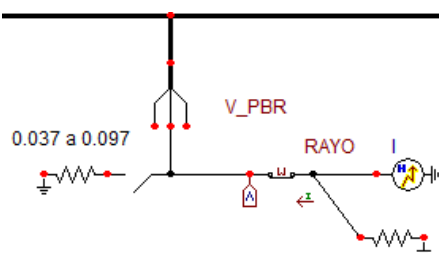


Figura 6. Representación Gráfica del modelo HEIDLER

Para determinar el tipo de descarga atmosférica, es necesario realizar simulaciones en el programa ATPDraw [4], utilizando representación de los Transformadores de Corriente con fines de mantener una referencia de acuerdo con la instalación real de los relevadores de protección, estos utilizan los devanados secundarios de los transformadores de corriente como fuentes de entrada de corriente, y además para la extracción o lectura de la muestra de la señal de la onda viajera TWS.

IV. REPRODUCCIÓN DE UNA DESCARGA ATMOSFÉRICA SOBRE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN.

El evento de simulación en ATPDraw [5] corresponde a una falla provocada por una descarga atmosférica al 89.43% de un extremo, lo que equivale a una distancia de 91.75 km, adicionalmente y como complemento se obtiene una localización a partir del otro extremo de 11.16 km, equivalente al 10.87% del total de la longitud de la línea de transmisión. El caso base ajustado y sintonizado para simular exactamente el punto de falla obtenido a partir de los dos registros de falla, se muestra en la figura 7.

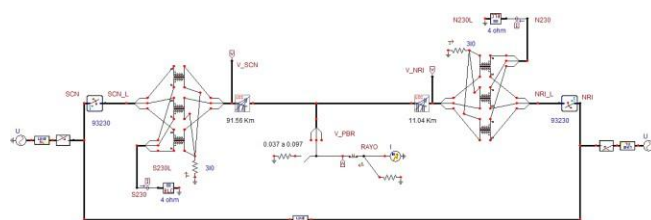


Figura 7. Caso base en ATPDraw sintonizado al punto de falla.

Es importante señalar que para este tipo de simulación no se requiere necesariamente sintonizar el caso base a las condiciones de transferencia de potencia activa y reactiva (condiciones de sistema), así como las condiciones de voltaje de prefalla, pero independientemente del tipo de investigación o estudio que se realice es recomendable, ya en la mayoría de las veces, un caso base bien elaborado y sintonizado a las condiciones del sistema, siempre es útil para continuar con más investigaciones y/o estudios de interés para distintos usuarios.

Para continuar con la investigación, como primera actividad es procesar los archivos de falla [1] y [5], graficando las señales TWS, correspondientes a la fase fallada, siendo en esta investigación, falla a tierra en la fase B, esto de acuerdo con las banderas de operación (ver figura 8) de la protección de distancia, (Relevador 21).

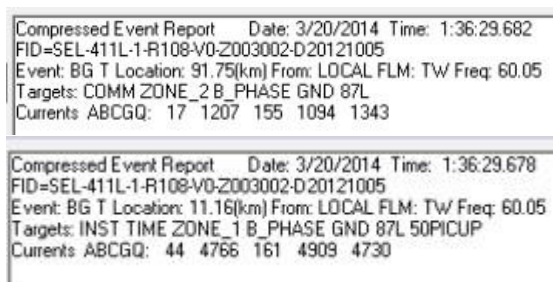


Figura 8. Banderas de Operación de las Protecciones de Distancia.

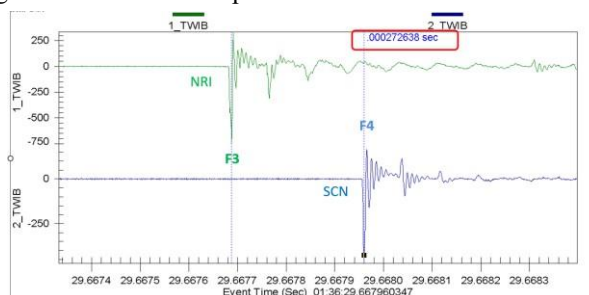


Figura 9a). Mediciones de “delta t” obtenidas de las TWS

Al realizar las mediciones de la diferencia de tiempo de la recepción de la señal TWS de la fase B en ambos extremos se obtiene un valor promedio de 0.000271998s. Ver figura 9a) y 9b).

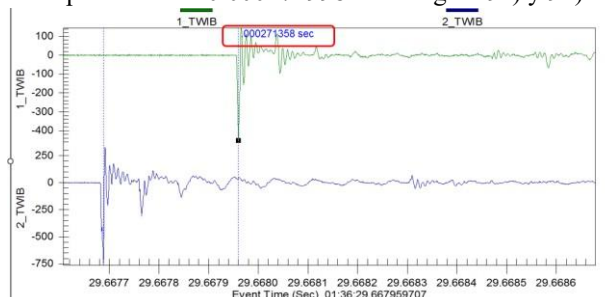


Figura 9b). Mediciones de “delta t” obtenidas de las TWS

Entonces para utilizar el algoritmo del cálculo manual de la distancia al punto de falla, a partir de la diferencia de tiempo de recepción de acuerdo con los registros TWS (en mi caso realicé dos mediciones, ver figuras 9a) y 9b), y promedíé el resultado, esto simplemente para buscar mayor precisión, pues la medición a partir del registro requiere una buena resolución por ser tiempos demasiado pequeños).

Los ajustes de la función TWS en los relevadores se muestran en la figura 10, se observa que el ajuste de la velocidad de propagación de la onda viajera es del 98% de la velocidad de luz (299,792,458 m/s) y, que la distancia total de la línea de transmisión está determinada en 102.6 km.

EPTDIR	:= N				
Fault Locator					
LLR	:= 102.60				
Travelling Wave Fault Locator					
LLUNIT	:= KM	TWLL	:= 102.60	SCBL	:= 270
				LPVEL	:= 0.9800

Figura 10. Ajustes de la función TWS en los relevadores 21

De acuerdo con lo anterior, lo que sigue es utilizar el algoritmo de cálculo manual para obtener la distancia a la falla, simplemente sustituyendo los datos de los registros de falla asociados a la función de TWS y los propios ajustes de la longitud total de línea de transmisión y de la velocidad de propagación utilizados como datos de entrada.

El procedimiento entonces es el siguiente [1]:

Se observa que la diferencia de tiempo entre los picos negativos de las dos ondas es 0.000271998 segundos, por lo que aplicando la formula se tiene:

$$FL = \frac{TWLL}{2} + (TPKL - TPKR) * C * LPVEL/2$$

Donde

TWLL.- Longitud de la línea.

TPKL.- Estampa de tiempo del lado Local del pico de la onda viajera.

TPKR.- Estampa de tiempo del lado remoto del pico de la onda viajera.

C.- Velocidad de la luz 299792.458 km/s

LPVEL.- Velocidad de propagacion, ajustada a 0.9875 en el relevador.

Por tanto se tiene la diferencia (TPKL - TPKR) conocida de los registros de falla, que en este caso sera 0.000271998 segundos.

Aplicando la formula se tiene para la longitud de linea de 102.6 km.

$$FL = \frac{102.6}{2} + (0.000271998) * 299792.458 * 0.9875/2$$

$$FL(SCN) = 91.56 \text{ km}$$

Se observa que el valor reportado por el relevador y por el calculo manual son parecidos.

Si se desea calcular la distancia del lado NRI, la formula debe de ser:

$$FL = \frac{TWLL}{2} - (TPKL - TPKR) * C * LPVEL/2$$

Aplicando la formula se tiene:

$$FL = \frac{102.6}{2} - (0.000271998) * 299792.458 * 0.9875/2$$

$$FL(NRI) = 11.06 \text{ km}$$

Continuando con la segunda actividad de la investigación y avanzando con este estudio, se procede a validar el caso base [4] y [5] elaborado en ATPDraw (ver figura 7), por lo que se desarrolla y ejecuta la simulación tomando como referencia los datos de la ubicación a la falla, de acuerdo con los registros de las banderas de los relevadores de protección. Los resultados de la simulación se presentan en la figura 11.

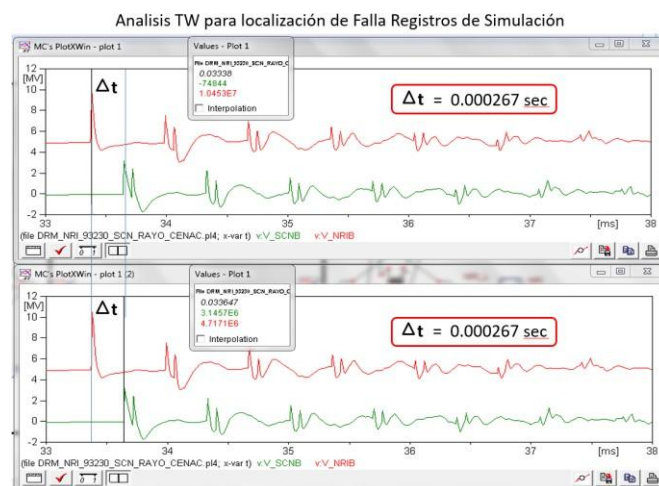


Figura 11. Gráfica del archivo de salida de la simulación en ATPDraw.

Se observa que el tiempo “delta t” de la simulación es del orden de 0.000267 s, muy cercano al valor obtenido en la medición de TWS por los relevadores de protección asociados. Por lo que aplicar el algoritmo directamente en el archivo gráfico de salida de la simulación se obtienen los resultados documentados en la figura 12, los cuales se calculan directamente desde el punto de referencia, es decir cuando $t=0.033334$ s, siendo el tiempo para el extremo más cercano $t=0.033374$ s y para el extremo más lejano $t=0.033645$ s, así que el cálculo de distancia a la falla a partir del archivo de salida, se obtiene solo de multiplicar en delta t correspondiente por la velocidad de propagación. En el primer caso el valor de delta t = 0.000005 s y en el segundo caso el valor obtenido de delta t = 0.000311 s.

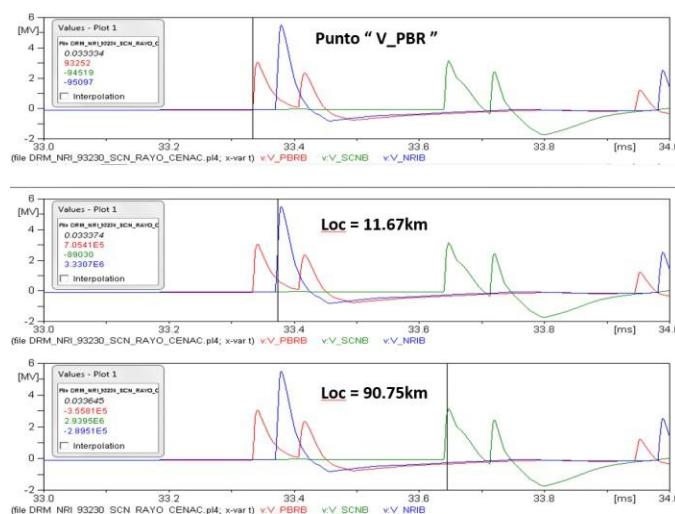


Figura 12. Resultados de los “delta t” de la simulación en ATPDraw.

Además, en este trabajo de investigación, se obtuvo la velocidad de propagación a partir del modelo de línea de transmisión, siendo este resultado el que se utiliza para el cálculo de la distancia a la falla para ambos extremos en esta simulación, los resultados se muestran en la figura 13, donde se puede observar que la velocidad de propagación de la onda viajera es de $v = 291802$ km/s. En el ajuste del relevador corresponde a “LPVEL=0.98” y Así que al utilizar este valor de velocidad y los delta t anteriores, tenemos:

$$(291802 \text{ km/s})(5\text{e-}6 \text{ s}) = 11.67 \text{ km}$$

y, para el otro extremo:

$$(291802 \text{ km/s})(3.11\text{e-}4 \text{ s}) = 90.75 \text{ km}$$

Siendo estos resultados de localización del punto de falla, muy consistentes con los valores obtenidos por las mediciones de los relevadores de protección de ambos extremos.

Es importante retomar también, los resultados del archivo de salida de la figura 13, en ellos se muestran los valores de impedancia serie de secuencia positiva y de secuencia cero de la línea de transmisión aérea, así como los parámetros de la impedancia en derivación de secuencia positiva y de secuencia cero, estos valores son muy útiles para cargar datos de entrada en otras aplicaciones, como pueden ser estudios de flujos de potencia, regulación de voltaje y estudios de cortocircuito.

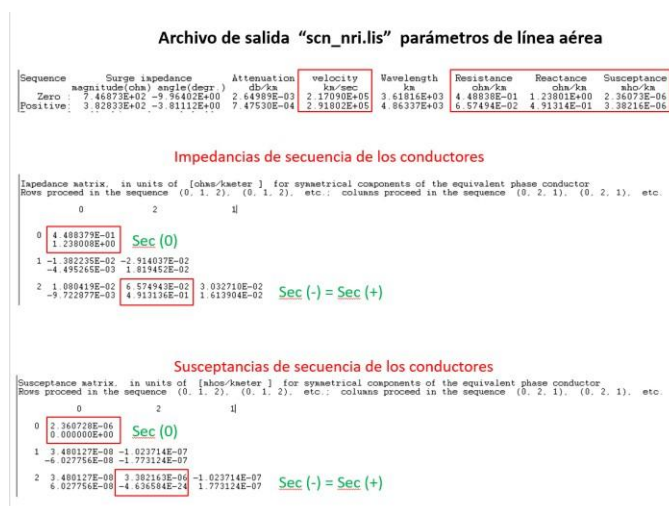


Figura 13. Resultado de la velocidad de propagación a partir de la simulación en ATPDraw.

V. DISCUSION TÉCNICA.

Dentro de la selección y aplicación de las nuevas tecnologías es importante el evaluar exhaustivamente tanto los equipos, como los puntos seleccionados para una correcta evaluación de su desempeño, siempre buscando que no haya afectación como consecuencia de ello, ante cualquier evento no deseado o algún imprevisto derivado de la falta de experiencia, en el entendido que serán utilizados en puntos estratégicos de los corredores de la RNT, los cuales son sumamente importantes, debemos garantizar en lo posible su disponibilidad y en caso de falla, debemos obtener lo antes posible la información precisa para su pronta atención y así evitar afectaciones de larga duración, que comprometen bajo ciertas condiciones, la seguridad del Sistema Interconectado nacional.

Es evidente que a medida que los requerimientos en temas de calidad, seguridad y estabilidad de la Red Eléctrica Nacional son más exigentes, debemos siempre buscar y aplicar estrategias encaminadas a resolver y/o solventar problemáticas existentes y ya conocidas, como también el estar preparados antes todas aquellas que aún no se han convertido en factores críticos.

VI. CONCLUSIONES.

Con el presente trabajo, podemos concluir que la aplicación y el uso de herramientas digitales para simulación de fenómenos transitorios electromagnéticos, como lo fue, para el caso de esta investigación, el uso del software de simulación ATPDraw, donde los resultados obtenidos son consistentes al ser comparados con las mediciones reales obtenidas a través de los relevadores de protección de una línea de transmisión que opera en 230kV, y con una longitud de 102.6 km.

La iniciativa de reproducir eventos es una actividad que genera grandes beneficios, con las simulaciones se pueden obtener resultados que pueden ser considerados durante los procesos de selección de equipos, así como el evaluar su desempeño antes de que se realicen actividades de puesta en servicio, previendo situaciones de riesgo o de afectaciones importantes que pueden afectar el sistema eléctrico, o bien generar costos ante fallas catastróficas.

Como pudimos establecer en esta investigación, el caso base de simulación en ATPDraw, se elaboró en agosto del 2013 y siete meses después, a solo tres semanas de haber instalado una pareja de relevadores en

calidad de BAJO PRUEBA, el 20 de marzo del 2014 ocurre una falla en el circuito de línea seleccionado considerando su estadística e historial de salidas de línea por descargas atmosféricas, de tal manera que sirvió como escenario para todo lo que aquí ya se expuso.

REFERENCIAS.

- [1] Artumira, “Análisis de las ondas viajeras”, 20 marzo 2014
- [2] Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN), Capítulo 5, pág. 84, 2023-2037
- [3] Alternative Transient Program (ATPDraw)
- [4] R. Ruelas T, “DRM_NRI_93230_SCN”, 16 agosto 2013
- [5] R. Ruelas T, “Registro_TWS_ATP_Rayo_RRT”, 20 marzo 2014