



Identificación del Trabajo	
Área:	Medio ambiente, contingencias y desarrollo sustentable
Categoría:	Alumno
Regional:	San Nicolás

## Modelado y análisis de respuesta dinámica de un sistema eléctrico industrial con inserción de energía renovable

**Nicolás Rouge, Natanael Moreno**

Facultad Regional San Nicolás (Colón 332, San Nicolás de los Arroyos), UTN

E-mail de autores: [nicorouge72@gmail.com](mailto:nicorouge72@gmail.com), [natanaellmoreno@gmail.com](mailto:natanaellmoreno@gmail.com).

*Este trabajo ha sido realizado bajo la dirección del Dr. Pablo Rullo, en el marco del proyecto “Modelado, operación y control de microrredes con alta penetración de fuentes de energía renovable no convencional para generación distribuida” (2019-2020)*

### Resumen

En este trabajo se estudiará la respuesta dinámica de un sistema de potencia industrial con inserción de fuentes de energía renovable. El caso de estudio se modela utilizando el software ETAP, y se simularán diferentes escenarios de interés. Se analizarán las perturbaciones que afectan la correcta operación del sistema y su estabilidad. Se evaluará el deslastre de carga y se determinarán los tiempos críticos para el despeje de fallas, arranque de generadores y motores. Observando la interacción entre sistemas independientes, se simulará la operación automática de dispositivos de protección e interruptores aplicando criterios de selectividad, así como el efecto sobre el sistema de arranque y re-aceleración de motores a través de análisis dinámicos. Se analizará el flujo de carga de la red de potencia obteniendo la forma óptima de transmitir energía.

**Palabras Claves:** Sistemas eléctricos; Energía renovable; Estabilidad; Etap

### 1. Introducción

La energía es la capacidad que tienen los cuerpos para producir trabajo. Este último puede ser, por ejemplo, trabajo mecánico o generación de calor. El hombre utiliza energías renovables desde sus inicios, ya que el sol, el viento y el agua son indispensables para la vegetación, animales y personas. A partir de la revolución industrial comenzó a crecer la utilización de combustibles fósiles como petróleo, carbón y gas natural. A partir de este punto, surge la clasificación de las fuentes de energía, renovables y no renovables. La energía renovable, a diferencia de las no renovables, es aquella que es inagotable, ya que el mundo la provee continuamente, por ejemplo mediante la radiación solar o la atracción gravitatoria, para el caso de la energía solar y eólica (Shallenberg, et al, 2008)

En las últimas décadas, la preocupación por la transformación de una matriz energética fuertemente basada en combustibles fósiles ha venido creciendo a nivel mundial y regional. Por un lado, impulsada por un escenario futuro de disminución de reservas de hidrocarburos, y por otro lado como un paliativo a los grandes problemas socio-ambientales generados por la explotación y utilización estas fuentes de energía. El desarrollo sostenible ha sido definido por la Comisión Mundial para el Medioambiente y el desarrollo de la ONU como “aquél desarrollo que satisface las necesidades del presente sin poner en peligro la capacidad de las generaciones futuras para

satisfacer sus propias necesidades”. La idea planteada hace referencia a una idea de que es posible conservar el capital natural y cultural de un territorio sin comprometer su desarrollo presente y futuro. (*Shallenberg, et al, 2008*)

El actual sistema energético resulta insostenible. En este sentido, en nuestro país existe la Ley 27.191 de Energías Renovables, la cual prevé metas de inserción de fuentes renovables en la matriz de generación de energía eléctrica nacional para los próximos años (Ley 27.191). A su vez, se impone que estas metas sean cumplidas por grandes usuarios del sistema. Una de las formas de cumplir con este requisito es a partir de la autogeneración.

En este trabajo se modela el sistema de potencia simplificado de una gran industria de la región con el objetivo de conocer en profundidad la inserción de energías renovables y comprobar escenarios reales con respecto a los aportes de energía convencional en un sistema. Para ello se utiliza el software para sistemas de potencia ETAP, actualmente utilizado por dicha industria en sus estudios (*Moitre D., 2015*) Se simularán escenarios de pérdidas de generación, tanto convencional como eólica, y se analizará el caso de deslastre de carga con el objetivo de obtener una respuesta que asegure la correcta operación del sistema y sus protecciones, garantizando la continuidad del servicio y su calidad.

## **2. Metodología**

El modelado del caso de estudio y la simulación de diversos escenarios de interés se realiza utilizando el software ETAP, un programa de análisis de sistemas eléctricos de potencia, gráfico-interactivo que posee módulos de simulación en modo off-line. A su vez, Permite la adquisición de datos de operación para monitoreo avanzado y simulación en tiempo real. (*Moitre D., 2015*)

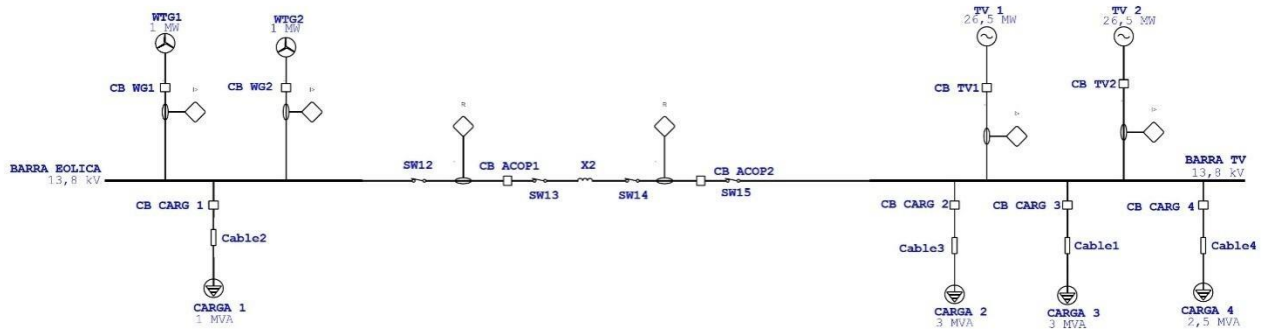
Alguno de los estudios típicos que se suelen realizar con este software son: Flujo de potencia equilibrado, cortocircuito, flujo de potencia trifásico, flujo de potencia con armónicos, flujo de potencia óptimo, coordinación de protecciones, dinámica de motores, estabilidad transitoria, ubicación óptima de bancos de capacitores, mallas de puesta a tierra, riesgo eléctrico, evaluación de confiabilidad, flujo de potencia en CC (Corriente Continua), cortocircuito en CC y dimensionamiento de baterías.

### **2.1. Modelado**

El esquema unifilar del caso de estudio se presenta en la Fig. 1. El mismo representa un sistema de potencia conectado a la red, que cuenta con 2 generadores convencionales de 26,5 MW cada uno y 2 campos eólicos que aportan un total de 2 MW. Todos los dispositivos de corte cuentan con sus correspondientes protecciones. En la simulación las cargas puntuales con una variación distribuida del 15% carga rotativa y el 85% estático con una potencia consumida de 8,5 MVA.

**Tabla I.** Componentes eléctricos del circuito

	Elementos
I)	2 Generadores turbo-vapor (26,5 MW)
II)	2 Campos eólicos (2 MW)
III)	8 Interruptores Westinghouse - 144-G-1500
IV)	4 Relé de sobreintensidad GE Multilin G60
V)	2 Relé multifunción GE Multilin T60
VI)	Cargas distribuidas (15% rotativa - 85% estática)
VII)	Conductor BS6622 - 15kV - XLPE (20 metros)

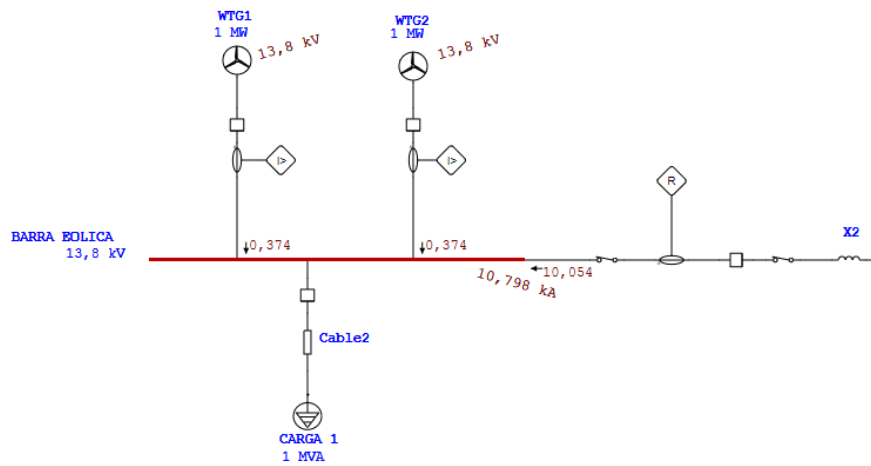


**Figura 1.** Esquema unifilar del sistema de potencia estudiado

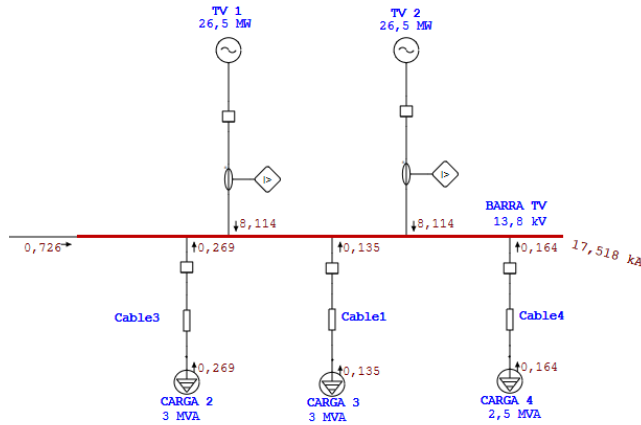
### 3. Resultados

#### 3.1. Análisis de cortocircuito

Se realiza la simulación para calcular las corrientes de cortocircuito trifásico en las barras generadoras Eólicas y Convencional donde los mismos hacen sus aportes al sistema. Se visualiza que tenemos mayor corriente de cortocircuito en la barra de TV ya que los generadores son de mayor potencia, ambos circuitos están separados con reactor limitador X2 que amortiguará las corrientes de cortocircuito de los dos circuitos.



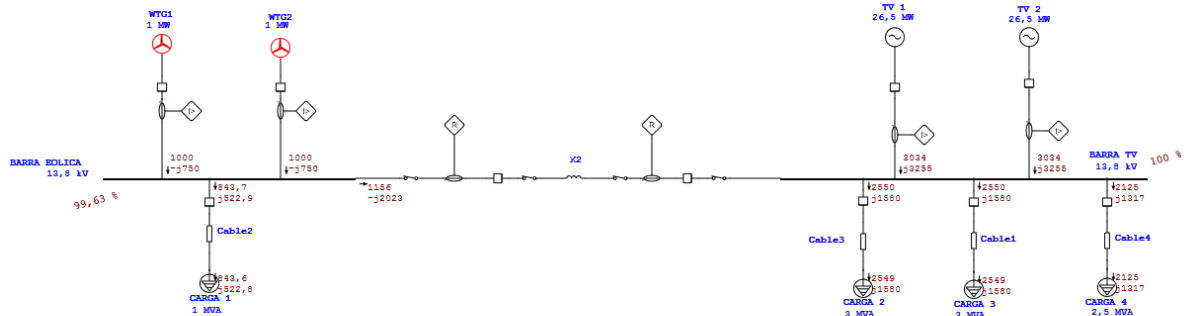
**Figura 2.** Cortocircito trifásico en la barra generadora WTG



**Figura 3.** Cortocircito trifásico en la barra generadora TV

### 3.2. Análisis de flujo de carga

Al realizar el flujo de carga en el software en ambos modelos los valores arrojan resultados óptimos. Esto nos indica que el dimensionamiento del sistema está bajo condiciones de operación. Esta herramienta nos permite tener un control de sobrecarga de la instalación actual y futura.

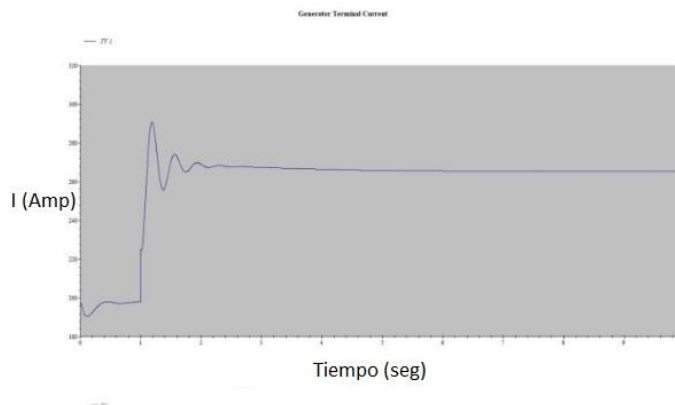


**Figura 4.** Análisis de flujo de carga del circuito modelado

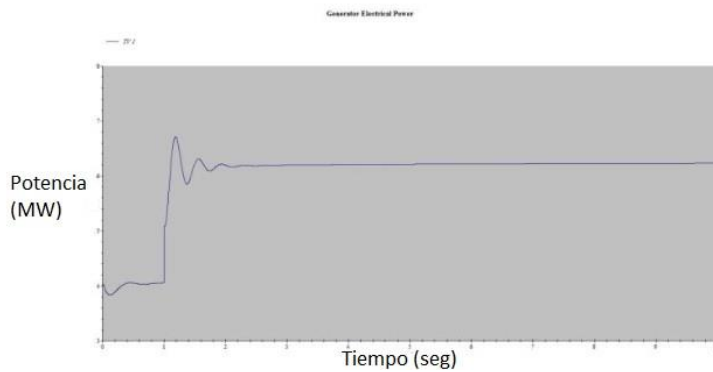
### 3.3. Análisis de estabilidad transitoria

Para el análisis de la respuesta dinámica del sistema se tuvieron en cuenta tres escenarios: (i) pérdida de los generadores eólicos, (ii) pérdida de generador convencional, (iii) deslastre de carga. En cada uno de ellos se estudiarán variables típicas del sistema.

Escenario 1 - Pérdida total de generadores eólicos: En el tiempo  $t = 1$  segundo el interruptor del generador WTG1 se abre, y se simula un periodo de 10 segundos. En las Fig.2-6 se presenta la respuesta dinámica de la corriente, potencia y velocidad del generador TV1 y frecuencia y tensión en la barra TV. El generador TV2 presenta un comportamiento similar al TV1 por lo que no es incluido.



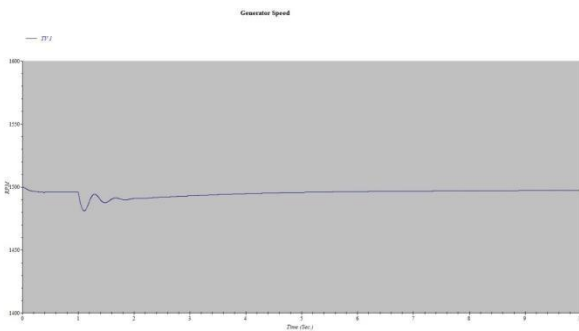
**Figura 5.** Corriente en el generador a vapor 1 (TV1)



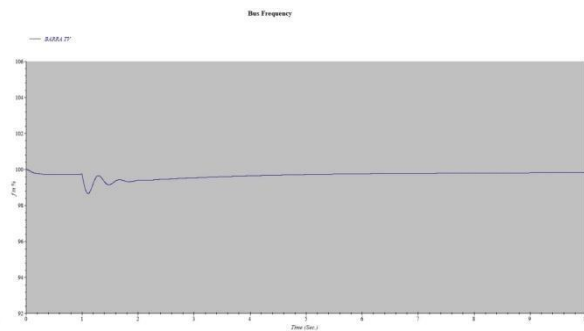
**Figura 6.** Potencia generada en TV1

En la Fig. 5 se observa que a partir de la pérdida de la generación eólica, la corriente en los TV aumenta notablemente hasta alcanzar un valor máximo. Luego de llegar al pico de corriente, se produce una oscilación transitoria hasta estabilizarse en un valor de corriente mayor al que el generador estaba trabajando inicialmente producto al consumo que abastecía las turbinas eólicas.

En la Fig. 6 se puede analizar que la curva de potencia generada varía de forma similar a la corriente en el TV, debido a la relación directa entre estos dos parámetros.

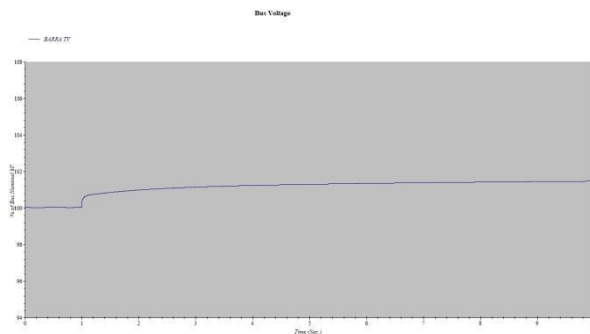


**Figura 7.** Velocidad del generador TV1



**Figura 8.** Frecuencia en la barra generadora (TV1)

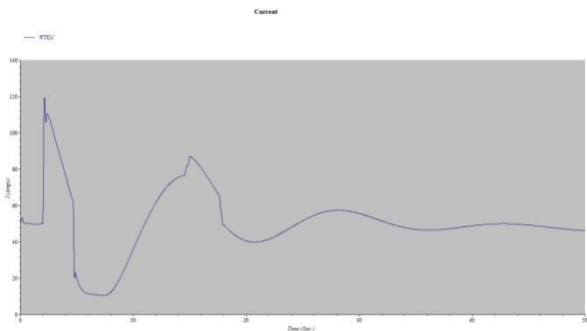
En la Fig. 7 puede observarse que al producirse el evento la velocidad del generador se reduce en un primer instante producto del aumento de la carga neta que debe alimentar el mismo. Luego de un transitorio oscilatorio, la velocidad se recompone a su valor nominal. La frecuencia de la barra TV tendrá un comportamiento idéntico a la velocidad del generador.



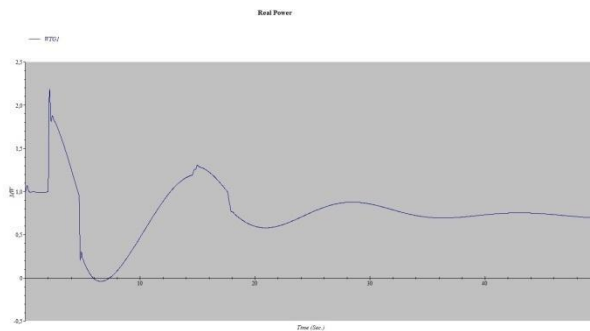
**Figura 9.** % nominal en KV de la barra generadora (TV1)

En la Fig. 9 se muestra la evolución en la tensión en la barra TV frente a la caída de los generadores eólicos. Se observa un aumento de los valores porcentuales en el instante del evento que luego se estabilizan

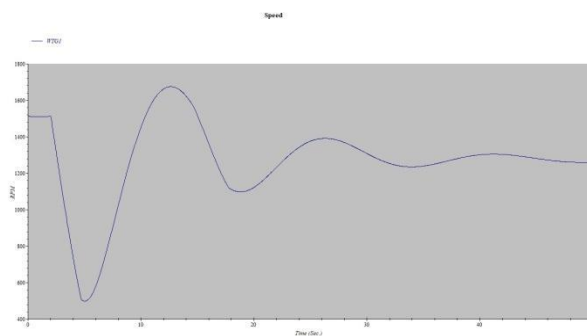
**Escenario 2 - Pérdida del generador convencional TV1:** .El tiempo total de simulación es  $t = 50$  segundos cuando el evento ocurre en  $t = 2$  segundos. Se visualizará el comportamiento en los generadores eólicos WTG1 y WTGT2 a su vez en las barras generadoras. Figuras 7, 8, 9,10 y 11.



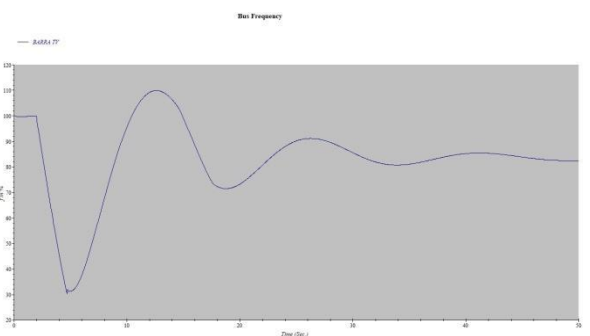
**Figura 10.** Corriente generador Eólico 1 (WTG1)



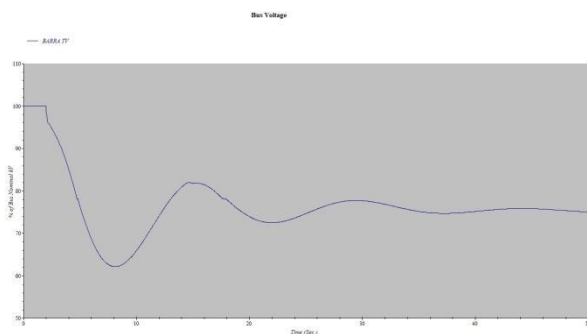
**Figura 11.** Potencia generador Eólico 1 (WTG1)



**Figura 12.** Velocidad generador Eólico 1 (WTG1)



**Figura 13.** Frecuencia en la barra generadora (WTG1)



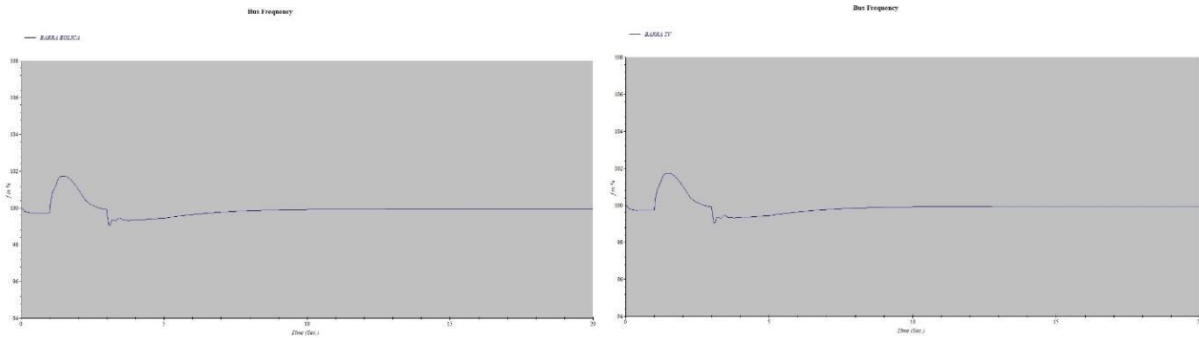
**Figura 14.** % nominal en KV de la barra generadora (WTG1)

Se puede observar en las figuras 10 y 11 los parámetros de corriente y potencia alcanzan un valor elevado en el instante del evento, en ese instante comienza una oscilación transitoria que se extiende en comparación con los convencionales (TV) producto a su menor dimensionamiento,

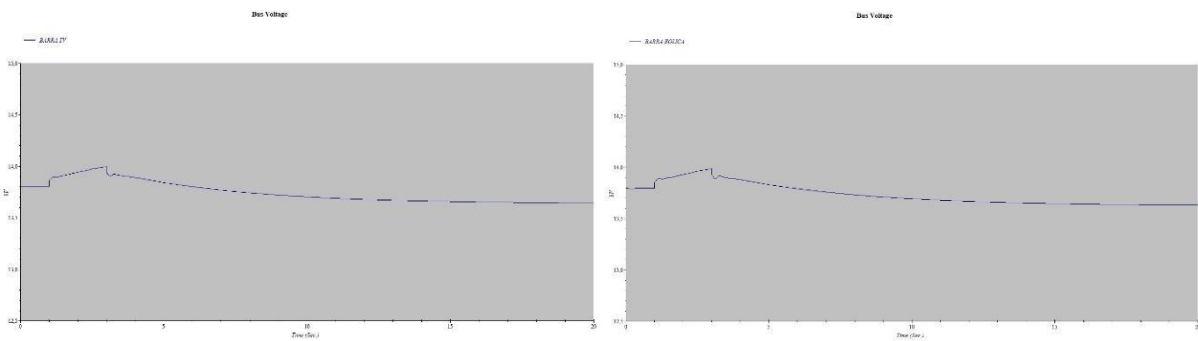
La velocidad y frecuencia en la barra WGT1 en el momento del escenario simulado, es notable que el generador pierda velocidad, esto es producto a la pérdida importante de

generación, en comparación al TV la generación eólica contiene tiempos prolongados de estabilización figura 12 y 13. El porcentaje de tensión en la barra en el momento de la pérdida de generación disminuye notablemente, luego comienzan a estabilizarse para dar continuidad en su servicio figura 14.

**Escenario 3 - Deslaste de carga:** Queda fuera de servicio la carga N°4 en un tiempo total de simulación  $t = 20$  segundos con una potencia de 2,5 MVA, saliendo la carga antes mencionada al segundo de simulación y realizando un re-cierre en  $t = 2$  segundos. Se visualizará frecuencia y tensión en las barras generadoras y en los generadores tanto TV como WGT.

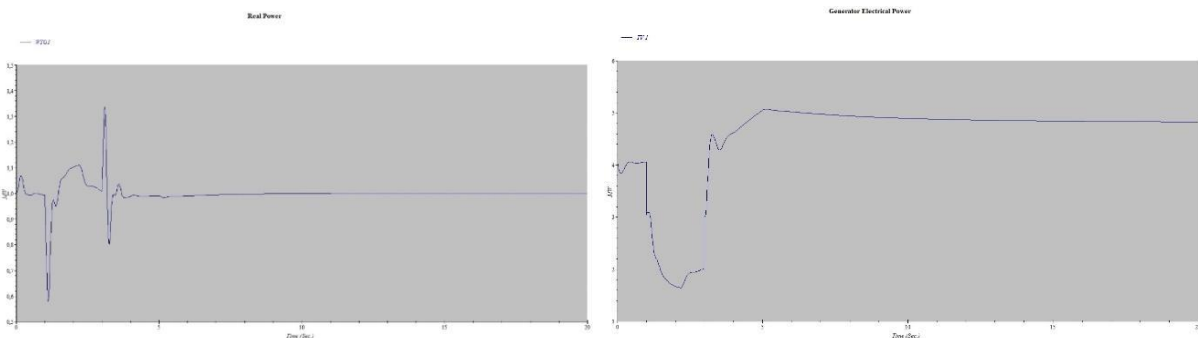


**Figura 15.** Frecuencia en barras WGT1 y TV1



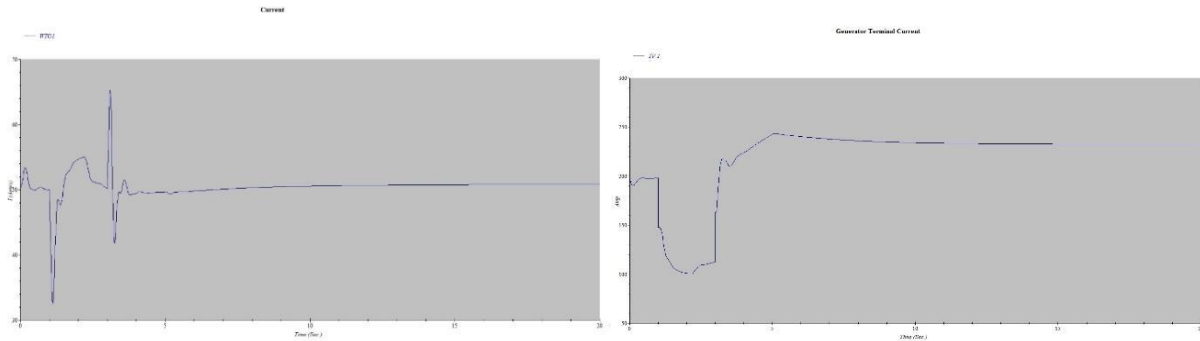
**Figura 16.** Voltaje en KV en barras WGT1 y TV1

En el momento del deslaste de carga, la frecuencia y tensión en las barras presentan un incremento de sus valores, pero regresan rápidamente a sus valores nominales sin oscilación transitoria notable. Figuras 15 y 16.



**Figura 17.** Corriente en barras WGT1 y TV1





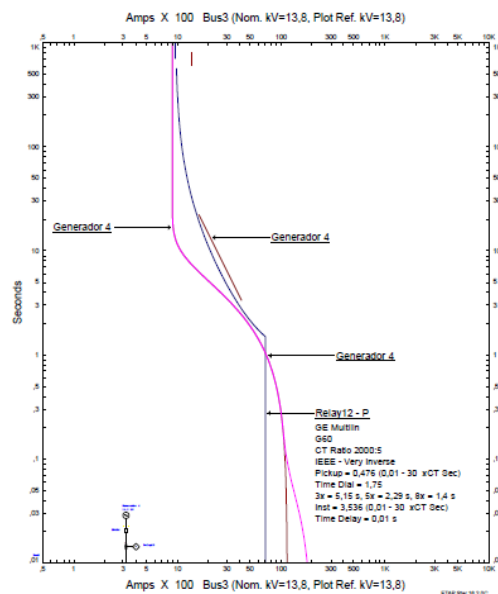
**Figura 18.** Potencia en barras WGT1 y TV1

En el análisis de corriente vemos que en el WGT1 al instante del deslastre de carga tiene una disminución notable de corriente, inmediatamente intenta recuperarse hasta los 2 segundos del re-cierre hasta estabilizarse y mantener su condición nominal. En la TV1 la corriente en el mismo instante disminuye notablemente pero su tiempo de recuperación es más prolongado que el WGT1. Figura 17

Respecto a la potencia de las dos generaciones se comportan iguales para poder dar continuidad al servicio. Figura 18.

#### 4. Selectividad de relé protecciones en generador

Las curvas de protecciones están seteadas en valores óptimos para la apertura del interruptor por cualquier evento que ocurra en la barra de aporte, las máquinas están protegidas con un relé diferencial, direccional y ante secuencias negativas, estos seteos están incluidos en el mismo equipo de protección.



**Figura 19.** Curva relé de protección TV1.

## 5. Discusiones y conclusión

El presente análisis reveló que a través del modelado del sistema eléctrico de potencia se obtuvieron resultados confiables en los escenarios simulados. A través del flujo de carga se garantiza el óptimo funcionamiento de la instalación ya que todas las barras modeladas no saturaron. Todos los dispositivos instalados verifican que su dimensionamiento es apto para soportar todas las corrientes de cortocircuito de la instalación. Mediante los eventos simulados en los análisis transitorios se obtuvieron diferencias en las respuestas para la reposición del servicio en los distintos tipos de generación. Independientemente de las potencias de cada máquina, se notaron leves variaciones entre los resultados obtenidos en base a la corriente y a la frecuencia de los mismos. Por otra parte, a través de la selectividad, se deduce que los generadores quedan completamente protegidos ante cualquier evento, sea en la barra como en la propia máquina.

En el presente trabajo se analizó la administración de energía tomando eventos en el cuál salen de servicio generadores convencionales y parte del sistema queda alimentado por los generadores eólicos, en esta situación se optó por mantener solo un sector de cargas críticas. Debido a esto, se representa una ventaja importante de la energía renovable ya que se traduce en una mejora para la continuidad del servicio ante escenarios imprevistos.

## Referencias

- ARGENTINA. Ley N° 27.191. Modificaciones a la Ley 26.190, "Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica" Infoleg. [Consulta el 01/07/2019] Disponible en: <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/250000-254999/253626/norma.htm>
- Benoit de Metz-Noblat, Gerard Jean-Jean (2000). Cuaderno técnico n°185. Estabilidad dinámica de las redes eléctricas industriales. Rueil-Malmaison: Schneider Electric.
- Moitre D. (2015) Curso de capacitación de ETAP
- Shallenberg, et al (2008). Energías renovables y eficiencia energética. Canarias: Instituto Tecnológico de Canarias.