



Identificación del Trabajo	
Área:	Energía
Categoría:	Alumno
Regional:	Facultad Regional Santa Fe

## **Prioridad de instalación de proyectos de generación distribuida en un corredor radial según criterio de estabilidad de tensión**

---

**Emmanuel SANGOI, Marcos CEA**

*Grupo de Control y Seguridad Eléctrica (CySE), Facultad Regional Santa Fe, UTN*

*E-mail de contacto: emsangoi@gmail.com*

*Este trabajo ha sido realizado bajo la dirección de los Ing. Andrés Zóttico y Ulises Manassero, en el marco del proyecto "Técnicas Numéricas de Estimación y Optimización: Aplicaciones en Problemas de Nanotecnología y de Energía Eléctrica".*

### **Resumen**

---

El corredor radial del noroeste de la provincia de Santa Fe, debido a su gran extensión y demandas importantes, presenta serios inconvenientes para su operación normal frente a escenarios de máxima demanda. En trabajos anteriores el Grupo de Control y Seguridad Eléctrica ha evaluado la ubicación, el modo de despacho y los módulos de potencia más apropiados de la generación distribuida a instalar en la región.

Este tipo de generación manifiesta impactos notables en los perfiles de tensión de un corredor radial. De acuerdo al desarrollo de las curvas P-V y Q-V, fue analizada la estabilidad de tensión del corredor y con ello se estableció un orden de prioridad en la ejecución de cada uno de los proyectos propuestos.

Como aspecto desfavorable, se observa que una mayor inyección de potencia reduce el margen entre la tensión de colapso del sistema y la mínima admisible para la prestación normal del servicio.

**Palabras Claves:** Estabilidad; Tensión; Colapso; Generación Distribuida

---

### **1. Introducción y Objetivos**

Desde hace ya casi una década, nuestro país atraviesa serias dificultades en materia energética. Los mismos datos oficiales dejan de manifiesto la gravedad de la situación. Se destaca la gran brecha existente en los últimos años entre el crecimiento de la demanda –a razón de 4,5% anual- y la potencia de generación de energía eléctrica instalada –a razón de 1,8%-. A su vez, la importación neta de electricidad al país pasó de 1,7% del total consumido en 1991 a algo más del 2% en 2001 y a casi 8% en 2011. En un periodo en que el PIB creció al 4,7% anual, y el consumo a una tasa ligeramente menor (3,9%), la capacidad de generación creció en menos de la mitad.

Como consecuencia, el marcado retraso de las inversiones en el sector de distribución impide la concreción de obras de transmisión que ofrezcan soluciones de mediano y largo plazo para el sistema, debiendo abocarse entonces a paliar las problemáticas con obras que impliquen plazos cortos de ejecución y costos más accesibles.

La región noroeste de la provincia de Santa Fe no escapa a esta problemática, pues presenta sectores industriales en constante crecimiento que demandan cada vez más energía para sus procesos. Por otra parte, el sistema presenta un corredor radial de gran extensión -más de 330 km-, que abarca desde la ciudad de Esperanza hasta la ciudad de Tostado. Es de destacar que las soluciones de mediano y largo plazo exigen la construcción de líneas de 132 [kV] con longitudes mínimas de 80 km, costos de inversión del orden de los 15 millones de dólares y un tiempo de ejecución de al menos treinta meses. Todas estas cuestiones tornan imposible el alcanzar los requerimientos del crecimiento de la demanda de la región en el plazo pretendido y con un nivel de calidad del producto técnico aceptable para la operación normal del subsistema.

Surge entonces, como solución inmediata de corto plazo, la instalación de generación distribuida (GD) en el nivel de distribución del corredor.

La GD se ha convertido en una opción atractiva para lograr la penetración progresiva de las fuentes de generación renovable (Jaganathan, R. K. y Saha, T. K.; 2004). Como aspectos favorables, la GD brinda la posibilidad de retrasar una obra de transmisión, con las siguientes características (Piumetto y Gómez Targarona; 2010):

- Aporte de reactivo a la red, reduciendo así las pérdidas joule en líneas de transmisión
- Reserva del subsistema frente a contingencias en la red de 132 kV.
- Menor costo inversión y tiempos rápidos de ejecución.

Según la topología radial del subsistema, el ingreso de GD se encuentra condicionada a las exigencias de estabilidad de tensión (EDT) del corredor; pues los fenómenos de colapso de tensión en sistemas de transmisión están asociados a la localización de las unidades generadoras respecto de los centros de demanda, de la efectiva disponibilidad de equipos de inyección de potencia reactiva y por supuesto del grado de mallado de la red. En el caso de los sistemas de distribución las situaciones de inestabilidad se deben típicamente a circuitos radiales de gran longitud con importantes caídas de tensión (Cassin, M.; 2008).

La EDT ha sido en las últimas décadas la principal limitante en la operación de los sistemas eléctricos de potencia (SEP). Su definición hace referencia a la habilidad de un SEP para mantener voltajes estables de operación en todas sus barras luego de ser sujeto a disturbios desde una condición inicial de operación normal (Hammad, A.; 1996). En general, un sistema entra en estado de Inestabilidad de Tensión cuando un disturbio, un incremento de la demanda o el cambio en las condiciones del sistema causa la progresiva e incontrolable caída de tensión (Jaganathan, R. K. y Saha T. K.; 2004).

Los principales factores que contribuyen al colapso de tensiones son (Kundur, P; 1994): la generación de potencia reactiva, los límites del control de tensión, las características de las demandas y los dispositivos de control tales como los reguladores bajo carga de los transformadores.

En el corredor radial de 132 kV del noroeste de la provincia de Santa Fe, el CySE ha desarrollado con anterioridad un análisis de la ubicación apropiada de la GD (Manassero, U. et al; 2014), con los módulos admisibles de potencia nominal y el modo de despacho más conveniente.

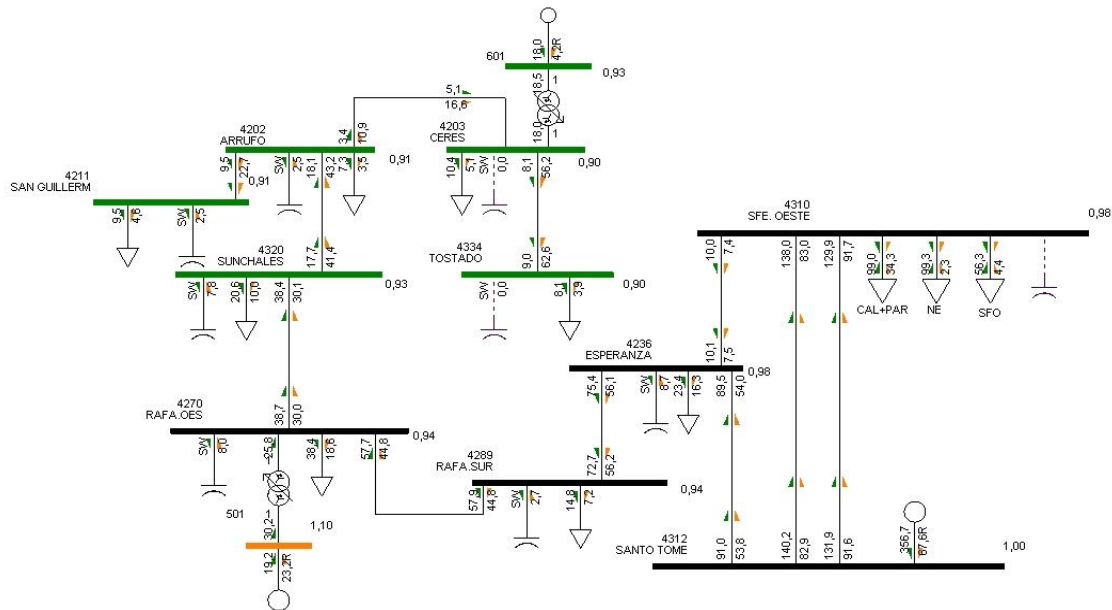
De acuerdo entonces a las ubicaciones preestablecidas, el objetivo de este trabajo se focalizó en determinar el orden de prioridad de los proyectos de GD propuestos -y su despacho de potencia correspondiente- según un análisis de la EDT del subsistema ante diversos escenarios de generación.

## 2. Metodología

### 2.1. Descripción del subsistema analizado e hipótesis adoptadas en las simulaciones

El subsistema radial de 132 [kV] tiene como nodo fuente la Estación Transformadora (ET) Santo Tomé de 500/132 [kV] -perteneciente a la Transportista Transener S.A- y como nodo extremo de sumidero a la ET Tostado ubicada en la localidad homónima. En su totalidad, el corredor tiene una extensión de 330 km y en su recorrido se vinculan las siguientes ETs de 132/33/13,2 [kV]: Esperanza (ESP), Rafaela Oeste (RAO), Rafaela Sur (RAS), Sunchales (SUN), San Guillermo (SGU), Arrufo (ARU), Ceres (CER) y Tostado (TOS).

El subsistema fue modelado con el software de simulación de sistemas eléctricos de potencia PSSE, versión 33 universitaria (ver figura 1). Fueron utilizadas sus herramientas de cálculo de flujo de potencia en estado estable y análisis P-V y Q-V.



**Figura 1.** Modelo del subsistema de la región noroeste de Santa Fe

Para el escenario en estudio, la demanda total del subsistema es de 150 [MVA], siendo los centros de consumo más importantes Esperanza (29 [MVA]), Rafaela (59 [MVA]) y Sunchales (23 [MVA]), pues entre ambos representan aproximadamente el 75% de la demanda del corredor.

Los criterios adoptados para el modelado del subsistema y las simulaciones fueron los siguientes:

- Modelos de demandas de potencia constante y factor de potencia 0,9 inductivo.
- Demandas del subsistema correspondientes a las demandas máximas horarias registradas en cada ET durante el período anual que abarca desde abril de 2013 hasta abril de 2014.
- Líneas modeladas como líneas de longitud media.
- Rango de tensiones de operación normal del subsistema entre 0,93 y 1,07 [pu].
- Condiciones de sobrecarga de las líneas basadas en el límite térmico y mecánico de sus conductores.

- Los reguladores bajo carga de los transformadores de potencia de las ETs se encuentran en las posiciones nominales.

### *2.3. Metodología implementada en la determinación de prioridad de ejecución de los proyectos de GD.*

En el corredor radial de 132 kV del noroeste de la provincia de Santa Fe, el CySE ha desarrollado con anterioridad un análisis de la ubicación apropiada de la GD (Manassero, U. et al; 2014). Para un escenario de máxima demanda y considerando dos alternativas de despacho (modo P-V y modo P-Q), se evaluaron todas las localizaciones posibles de la GD, en barras de 13,2 y 33 kV de las respectivas ETs del corredor, determinando los módulos de potencia posibles de instalar. Para cada una de las simulaciones en estado estacionario se adoptaron criterios de máxima capacidad de inyección de generación en la ET (relacionada con la propia demanda y potencia de transformación de la ET), perfiles de tensión admisibles en el nivel de transmisión, mínimas pérdidas Joule en líneas de 132 kV y corrientes de cortocircuito en barras de distribución. Los resultados determinaron los módulos de potencia, con el tipo de despacho y la ET de conexión. Cabe destacar que el estudio no contempló el tipo GD a instalar, tal como eólica, térmica, fotovoltaica, etc. A continuación se detalla la capacidad nominal recomendada de la GD a instalar:

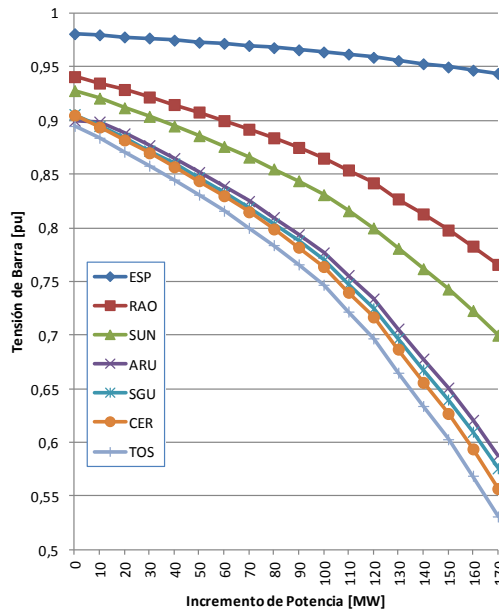
- GD de 10,5 [MW] en ET TOS en modo PV
- GD de 23,1 [MW] en ET ARU en modo PQ
- GD de 25,9 [MW] en ET SGU en modo PQ
- GD de 30 [MW] en ET SUN en modo PV

De acuerdo a estas ubicaciones preestablecidas, el objetivo de este trabajo se focalizó en evaluar la EDT del subsistema ante diversos escenarios de generación. Esto es concretamente, el análisis mediante la EDT del corredor, de acuerdo al comportamiento de las curvas P-V y Q-V de cada una de las barras que integran el mismo.

En una primera instancia, fue determinada la barra más débil de 132 kV según un análisis de EDT del subsistema en condiciones actuales (sin el ingreso de ninguna de las GD propuestas), para un escenario de máxima demanda y con la GD existente en la ET CER y RAO despachadas a plena potencia.

El análisis del subsistema para el caso base refleja que, como era de suponerse, a medida que se incrementa la distancia desde el nodo receptor con respecto a la fuente, el perfil de tensiones decae más abruptamente, para iguales incrementos de potencia, siendo la barra más comprometida la ET TOS (ver figura 2), que es justamente aquella que establece la capacidad remanente del subsistema -de acuerdo a la tensión mínima permitida para su operación normal.

Luego adoptando la barra más débil del sistema como barra testigo, fue analizado el aporte individual y combinado de las GDs propuestas a la mejora en la condición de voltaje admisible de operación y la capacidad remanente frente a condiciones de colapso de tensión.



**Figura 2.** Análisis PV de todas las barras del sistema de acuerdo a las condiciones actuales de operación

#### 2.4. Escenarios evaluados en las simulaciones

Si bien es cierto que los estudios P-V y Q-V incluyen el análisis de la red en condiciones de N-1, según la topología radial del corredor, la única contingencia simple posible de evaluar la constituye la apertura de algunos de los dos vínculos de la ET ESP con la fuente (Líneas Santa Fe Oeste–Esperanza y Santo Tomé-Esperanza). Sin embargo, resultan condiciones de sobrecarga en el enlace sano que debe evacuar toda la potencia -del orden de los 180 [MVA], frente a un límite térmico de los conductores de 147 y 169 [MVA] respectivamente-.

Los análisis P-V y Q-V fueron desarrollados entonces para operación de la red en condición normal y según un crecimiento de la demanda a intervalos de 10 [MW] por paso de cálculo. Los casos de inyección de nueva GD fueron evaluados de acuerdo a su ingreso en el subsistema en forma consecutiva, estableciendo entonces su prioridad de acceso en función del mayor beneficio que logra tal GD en la EDT del corredor.

### 3. Resultados

#### 3.1. Análisis Curvas P-V

Al considerar la EDT, es de interés observar la relación entre la potencia transmitida “P” y la tensión al final de la línea “V”. El proceso de análisis de EDT implica la transferencia de potencia de una región del sistema a otro, y el seguimiento de los efectos de la tensión. Entonces, la representación de la curva P-V representa la variación de tensión para una barra en particular en función del total de potencia activa suministrada a las cargas. En el "codo" de la curva P-V, el voltaje cae rápidamente cuando se produce un aumento en la demanda de carga. Las soluciones de los flujos de potencia no convergen más allá de este punto, lo que indica que el sistema se ha convertido en inestable. Este punto se denomina punto crítico y se identifica con el colapso de

tensión del subsistema. En general, los puntos de funcionamiento por encima del punto crítico implican un sistema estable.

A continuación se presentan y discuten los resultados obtenidos para las diferentes combinaciones de GD despachadas en la red.

### *3.1.1. Determinación del primer proyecto de GD a concretar*

En una primera instancia, como era de suponerse, la GD que debe tener un ingreso prioritario en la red, es aquella a ubicarse en la ET TOS –con una potencia nominal de 10,5 [MW]-, pues al tratarse del nodo extremo de un corredor extenso, presenta los perfiles de tensión más comprometidos (del orden de 0,9 pu) y como tal, constituye el elemento restrictivo que condiciona la operación normal de la red y su horizonte de crecimiento.

Entonces, el ingreso de la GD TOS mejora localmente los perfiles de tensión de la ET TOS –con un aumento del orden del 6% en barra de 132 kV-, pero también logra elevar los perfiles de tensión del resto de las barras. Respecto a la capacidad remanente del sistema, se tienen dos condicionantes: el más inmediato refiere al voltaje mínimo admisible de operación de la red -0,93 pu-, por lo que la capacidad remanente es de tan solo 20 [MW]; el segundo elemento restrictivo es la condición de colapso de tensión, que se presenta para un voltaje del orden de 0,66 pu en la ET TOS y un incremento de potencia en la red de 170 [MW].

### *3.1.2. Determinación del segundo proyecto de GD a concretar*

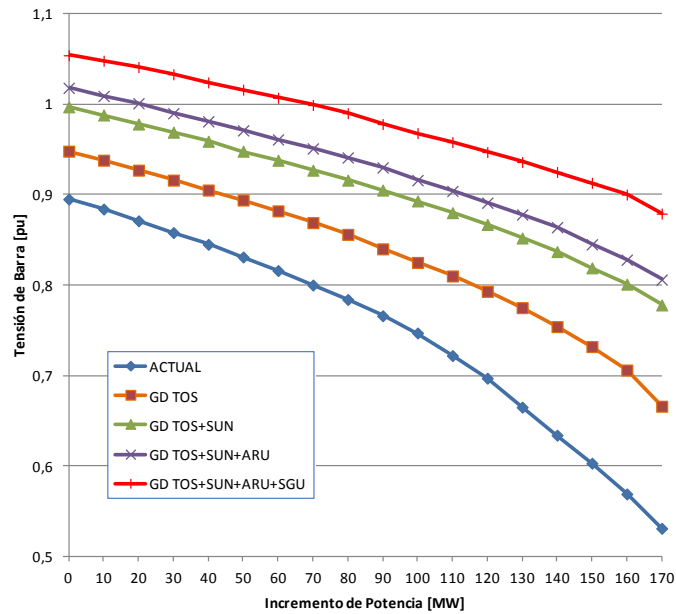
A partir del despacho prioritario determinado de GD TOS, fue efectuado el análisis P-V del despacho adicional de cada una de las tres variantes restantes de GD proyectadas para la red. Los resultados demuestran que la mejor opción para el corredor es la puesta en servicio de la GD SUN, de acuerdo a los perfiles de tensión obtenidos y la capacidad remanente del sistema que se extiende a 70 [MW] –en comparación con los 60 [MW] obtenidos con el despacho de la GD SGU o la GD ARU-.

### *3.1.3. Determinación del tercer proyecto de GD a concretar*

Despachadas las GD TOS y SUN, los resultados del análisis P-V demuestran que de las dos opciones existentes de GD a instalar, resulta recomendable la puesta en servicio temprana de la GD ARU, alcanzando la red una capacidad remanente de 90 [MW] y un nivel de tensión en la barra de TOS de 132 kV de 1,02 pu.

### *3.1.4. Impacto en la red del despacho conjunto de toda la GD proyectada*

Con la puesta en servicio de toda la GD proyectada para el corredor las condiciones de operación del mismo mejoran de forma sustancial. De acuerdo al voltaje mínimo admisible de operación de la red (0,93 pu), la capacidad remanente asciende a 135 [MW] –ver Figura 3-. Como aspecto desfavorable con respecto a los casos anteriores, se presenta una reducción del margen de potencia remanente para alcanzar el colapso de tensión de la red -170 [MW]-. Además, tal condición de inestabilidad presenta un nivel de tensión de 0,89 pu, que es una magnitud de operación posible de sucederse en la red.

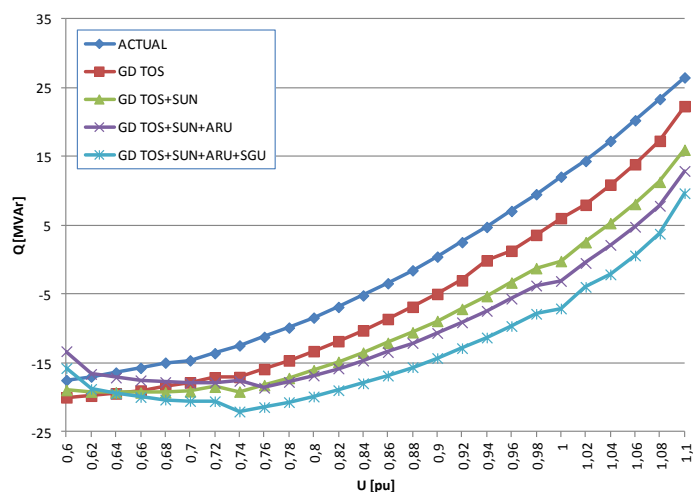


**Figura 3.** Análisis PV de la barra TOS para el orden de despacho de GD obtenido

### 3.2. Análisis Curvas Q-V

La curva Q-V muestra la sensibilidad y la variación de tensión en las barras con respecto a la inyección o absorción de potencia reactiva. El límite de EDT se presenta en el punto donde la derivada  $dQ/dV$  es cero. Este punto define también el mínimo de potencia reactiva requerido para una condición estable de operación de la barra. Un incremento en Q dará como resultado un aumento de la tensión en condiciones normales de funcionamiento. Por lo tanto, si el punto de funcionamiento se encuentra en la parte derecha de la curva, el sistema será estable. Por el contrario, puntos de funcionamiento en el lado izquierdo de la curva se consideran inestables.

El análisis de las curvas Q-V, efectuadas por el software PSS-E para los diferentes casos planteados, fueron evaluadas sobre la barra TOS que es la más lejana de la fuente y que también presenta la mayor sensibilidad de la tensión frente a la variación de reactivo. En la figura 4 se muestran las curvas obtenidas para el orden de despacho de la GD definida en el análisis P-V.



**Figura 4.** Curvas Q-V sobre la barra TOS para el orden de despacho de GD obtenido

Los resultados permiten arribar a las siguientes conclusiones:

- En las condiciones actuales de operación de la red, para la barra testigo analizada, deberían agregarse aproximadamente 4 [MVAR] para poder lograr condiciones normales de operación.
- Los escenarios evaluados de ingreso sucesivo de GD en el corredor presentan todos un margen de reactivo que varía entre 3 y 13 [MVAR] para la tensión mínima admisible.
- Con el ingreso sucesivo de GD, el colapso de tensiones se produce para un voltaje que va desde 0,6 pu para el ingreso de la primer GD a 0,76 pu en caso de despacho de toda la GD proyectada. Respecto al margen de reactivo, oscila entre 18 y 20 [MVAR].

#### **4. Conclusiones**

Los estudios de EDT resultan claves para evaluar la importancia y el impacto que producen en un corredor radial el ingreso de la GD, de acuerdo a módulos de potencia, modos de operación y ubicación de la misma.

El uso de las herramientas de análisis P-V y Q-V permite jerarquizar los diferentes proyectos de GD.

Con el ingreso sucesivo de cada proyecto de GD, se obtiene como beneficio para el corredor una mejor calidad del producto técnico –aumento de los perfiles de tensión- y una mayor capacidad remanente (incremento del horizonte de crecimiento de la demanda). Como aspecto desfavorable, se reduce progresivamente el margen admisible para alcanzar condiciones de colapso de tensión.

#### **Bibliografía**

- Cassin, M. (2008). Control de tensión en corredores radiales de 132 kv a través de recursos distribuidos. CLADE 2008; pp: 1-10.
- Hammad, A. E. (1996). Comparing the Voltage Control Capabilities of Present and Future VAR Compensating Techniques in Transmission Systems. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 11, pp:475-483.
- Jaganathan, R. K. y Saha T. K. (2004). Voltage stability analysis of grid connected embedded generators. Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC 2004); pp: 1-6.
- Kundur, P (1994). Power System Stability and Control. McGraw-Hill.
- Manassero, U.; Torres, J. L.; Zóttico, A.; Marelli, P. (2014). Estudio del emplazamiento de generación distribuida a instalar en la región del litoral. Congreso Ingeniería 2014 Latinoamérica y Caribe.
- Piumetto, M. y Gómez Targarona, J. C. (2010). Integración de la generación distribuida en una empresa distribuidora en el nivel de MT: su impacto, regulación y respuesta de la red. CIDEL 2010, pp:1-8.