

**B2 – Líneas Aéreas****Experiencia de UTE con el uso de sistemas para el cálculo de ampacidad dinámica en líneas aéreas de 150 kV**

**Morales N.\***  
UTE  
Uruguay  
nmorales@ute.com.uy

**Pena P.**  
UTE  
Uruguay  
ppenav@ute.com.uy

**Artenstein M.**  
UTE  
Uruguay  
martenstein@ute.com.uy

**Salvador I.**  
UTE  
Uruguay  
isalvador@ute.com.uy

**Abaracon R.**  
UTE  
Uruguay  
rbaracon@ute.com.uy

**Resumen** – El objetivo de este trabajo es transmitir la experiencia de UTE con el uso de sistemas de ampacidad en tiempo real en líneas aéreas de 150 kV. Se presenta una comparación de los resultados obtenidos durante el período de un año completo, utilizando 4 diferentes sistemas de cálculo de ampacidad en tiempo real para una misma línea de transmisión de 150 kV. Los sistemas analizados, estiman la ampacidad de la línea utilizando diferentes enfoques: a partir de la información de medidas ambientales tomadas por estaciones meteorológicas locales, utilizando sensores físicos instalados sobre el conductor de la línea aérea y utilizando variables ambientales obtenidas de proveedores satelitales.

**Palabras clave:** DLR, Dynamic Line Rating, Ampacidad, Líneas aéreas, Estaciones meteorológicas, Red de Transmisión

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante la última década, el sistema de transmisión uruguayo ha incorporado grandes cantidades de generación renovable distribuida geográficamente, con una potencia instalada que supera el 75% del pico máximo de demanda del país. Este importante cambio en su matriz energética ha modificado drásticamente la carga que circula a través de las líneas de transmisión, principalmente en las líneas aéreas de 150 kV, provocando que las mismas operen durante una mayor cantidad de tiempo con un nivel de carga más elevado que el habitual, transformándose en muchos casos, en una limitante para la inyección de potencia.

Esto ha motivado, al igual que a otros transmisores del mundo, considerar la aplicación de tecnologías para el cálculo de ampacidad dinámica en líneas aéreas, de forma de obtener un mejor aprovechamiento de la infraestructura ya instalada.

En general, el límite de carga de una línea aérea se define para que el conductor no supere una temperatura máxima de operación. Esta temperatura, será la menor entre la temperatura de *annealing* en que el conductor sufre daños irreparables y la temperatura de operación definida en el proyecto, temperatura en que el conductor llega al límite del galíbo admisible de acuerdo a las normas de seguridad establecidas.

En Uruguay, las líneas de 150 kV están diseñadas para operar a temperaturas de 55°C o 70°C, lo que hace que ésta sea la temperatura máxima de operación y su límite de carga queda definido para no violar la distancia de seguridad entre el conductor y el suelo (en UTE se utilizan como referencia las recomendaciones del NESG [1]).

Por otra parte, la ampacidad del conductor se calcula típicamente como la corriente en régimen que hace que el conductor llegue a esa temperatura máxima de operación, para determinadas condiciones meteorológicas fijas (típicamente de acuerdo a las recomendaciones propuestas por IEEE 738 [2] o CIGRE 299 [3]). Este

límite de corriente, es conocido como *ampacidad estática* o *rate estático* y ha sido históricamente utilizado en UTE tanto para planificar la expansión de la red, como para operar las líneas aéreas del sistema de transmisión. Durante los últimos años, al igual que en UTE, la inserción masiva de generación renovable a nivel mundial ha motivado a que las utilities hagan un esfuerzo por aprovechar la capacidad remanente de sus líneas aéreas, principalmente en aquellas redes donde la generación eólica tiene una gran presencia y en las cuales, parece razonable pensar que exista cierta correlación entre la generación de esta fuente y la refrigeración de los conductores aéreos en una vecindad de los parques generadores.

Por esta razón, durante los últimos años se ha incrementado el desarrollo de diferentes técnicas o equipos que permiten calcular ampacidades en tiempo real.

UTE comenzó a hacer sus primeras experiencias con el cálculo de ampacidad en tiempo real aproximadamente en el año 2006, implementando la operación de una línea de 150 kV, utilizando ampacidades dinámicas calculadas a partir de las variables atmosféricas medidas en una estación meteorológica cercana a uno de los extremos de la línea. A partir de ese momento, impulsados por la gran cantidad de generación renovable instalada en el país, se fue incorporando la utilización de ampacidad dinámica para la operación de más líneas aéreas y se mejoró la metodología de cálculo utilizando las medidas de estaciones en ambos extremos y en puntos intermedios.

Recientemente, UTE comenzó a incorporar tecnologías comerciales para la estimación de la ampacidad en tiempo real en líneas aéreas de 150 kV, con el objetivo de conocer diferentes opciones y contrastar los resultados obtenidos con cada una de ellas.

El objetivo de este trabajo, es presentar la experiencia de UTE referente a los sistemas de medición de ampacidad en tiempo real, a través de una comparación de los resultados obtenidos por cuatro diferentes sistemas, durante un período de un año completo. Los sistemas comparados basan su cálculo en diferentes metodologías. El primero de ellos, basa su cálculo en medidas de las variables ambientales (velocidad y dirección del viento, temperatura ambiente e irradiancia solar) reportadas por estaciones meteorológicas [EM] instaladas en las estaciones de transmisión cercanas a la línea, el segundo utiliza sensores físicos instalados sobre el conductor capaces de medir de forma directa la flecha y los restantes, basan sus cálculos en variables meteorológicas de proveedores satelitales sin requerir necesariamente el uso de estaciones meteorológicas o sensores físicos. Varios transmisores están explorando las diferentes tecnologías, con el objetivo de incrementar el aprovechamiento de la infraestructura existente [4] [5]. En [6], [7] y [8] se presenta una revisión de la tecnología y experiencias de su uso.

## 2. LÍNEA MONITOREADA

La línea monitoreada es una línea aérea de 150 kV con conductor ASCR TIGER, una longitud de 116 km y fue diseñada para operar a una temperatura máxima de 70°C. Las principales características físicas del conductor se muestran en la Tabla I.

Tabla I: Características físicas del conductor de la línea aérea monitoreada

Diámetro externo	16.54 [mm]	Masa	0.65 [kg/m]
Sección	162.13 [mm <sup>2</sup> ]	Módulo de Young	7945 [kg/mm <sup>2</sup> ]
Sección (Acero)	30.6 [mm <sup>2</sup> ]	Coefficiente de expansión lineal	17.8x10 <sup>-6</sup> [1/°C]
Sección (Aluminio)	131.2 [mm <sup>2</sup> ]	Resistencia (20 °C)	0.22 [Ohm/km]

La orientación de la línea es predominantemente este-oeste y está ubicada en un terreno suave, con la particularidad de atravesar zonas de montes con corredores de 60 m de ancho y que pueden llegar a medir varios cientos de metros de longitud.

Su ampacidad estática, ha sido calculada utilizando la metodología presentada en CIGRE 601 [9] y considerando variables atmosféricas conservadoras<sup>1</sup>; Temperatura ambiente 30°C (verano) y 20°C (invierno), velocidad y dirección del viento 0.6 m/s con un ángulo de incidencia de 90° sobre el conductor y 1100 w/m<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Para la operación de las líneas aéreas de 150 kV, UTE considera como verano los meses de diciembre a marzo inclusive e invierno desde abril a noviembre inclusive y será lo utilizado en este trabajo al momento de realizar la presentación de los datos.

de irradiancia solar. Para un diseño de operación de 70°C y, tomando las consideraciones anteriores, la ampacidad estática históricamente utilizada por la operación de UTE para la línea monitoreada es de 93 MVA en verano (diciembre a marzo) y 108 MVA en invierno (abril a noviembre).

Las líneas aéreas de 150 kV en Uruguay se instalan respetando una distancia mínima de 7 m con respecto al suelo (tomando un margen de seguridad respecto de lo establecido en el NESC [1], que establece una distancia mínima de 6.4 m para este nivel de tensión). El objetivo de utilizar estos sistemas será sacar un mayor provecho a la línea de transmisión, sin sobrepasar su temperatura de diseño y manteniendo entonces las distancias de seguridad para las cuales fue diseñada.

### 3. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS

Se consideran 4 sistemas diferentes para el cálculo de la ampacidad en tiempo real de la línea monitoreada. El primero de ellos utiliza variables atmosféricas reportadas por estaciones meteorológicas próximas a la línea monitoreada, el segundo utiliza sensores físicamente instalados en la línea con capacidad de realizar un cálculo directo de la flecha en el vano de instalación y los dos restantes utilizan datos atmosféricos satelitales para realizar el cálculo.

En la Fig. 1 se puede ver la orientación de la línea, las estaciones meteorológicas utilizadas para el cálculo de ampacidad, su distancia con respecto a la línea y los sensores físicos instalados.

En la Fig. 2, se muestra la elevación del terreno a lo largo de la traza de la línea y la ubicación de los sensores instalados sobre el conductor.

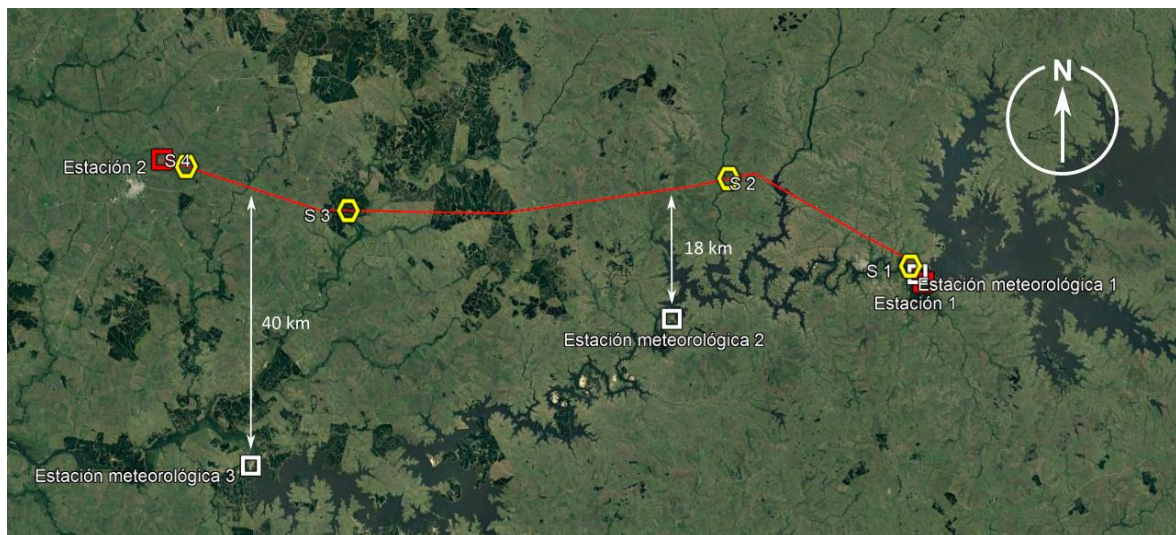


Fig. 1: Traza de la línea monitoreada con ubicación de sensores físicos y estaciones meteorológicas utilizadas en el cálculo de ampacidad

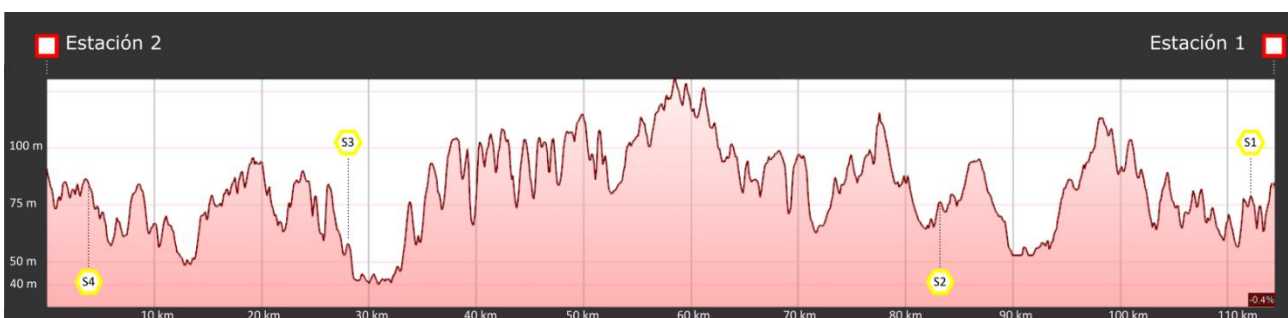


Fig. 2: Elevación del terreno a lo largo de la traza de la línea

A continuación, se describen las principales características de cada uno de los sistemas utilizados.

### 3.1. SISTEMA 1 (ESTACIONES METEOROLÓGICAS)

Este sistema fue implementado en el DCU<sup>2</sup> de UTE y realiza el cálculo de ampacidad basándose en la medida de condiciones atmosféricas de 3 estaciones meteorológicas ubicadas en las cercanías de la línea monitoreada. Una de las estaciones meteorológicas se encuentra ubicada en la Estación 1 extremo de la línea, la segunda y la tercera se encuentran en puntos intermedios a una distancia de 18 km y 40 km de la línea (ver Fig. 1). La altura de instalación es de aproximadamente 8 m en todos los casos.

Inicialmente, el sistema utilizaba las variables de temperatura ambiente, velocidad del viento e irradiancia solar medida por las EM, utilizando un ángulo fijo de incidencia del viento con el conductor de 90° para realizar el cálculo de ampacidad. A partir de abril, el cálculo se modificó para tomar en consideración el ángulo de cada tramo de la línea y el ángulo medido por las EM, informando la más restrictiva de las ampacidades calculadas.

Las EM reportan las medidas con una cadencia del orden del minuto y el software implementado realiza el cálculo utilizando como base el método propuesto por IEEE [2], reportando la ampacidad calculada cada 5 minutos.

### 3.2. SISTEMA 2 (SENSORES FÍSICOS)

Es un sistema industrial que utiliza sensores montados sobre el conductor de la línea, con la capacidad de medir directamente la flecha y estimar la velocidad del viento en el punto de instalación.

La línea monitoreada tiene instalados 4 sensores que realizan el monitoreo y reporte de datos a un servidor central con una cadencia de 5 minutos.

La ubicación de los sensores fue seleccionada en conjunto con el proveedor de los equipos, teniendo consideraciones como cambios de orientación de la traza o zonas con refugios naturales que pueden actuar como cortina de viento. En la Fig. 3 se muestra un ejemplo de esto último, donde se puede apreciar la ubicación del sensor S3 en una zona donde la línea atraviesa un bosque. Cuando hay inconvenientes en la comunicación de datos en más de 2 sensores simultáneamente, el sistema entra en un modo de falla y utiliza condiciones conservadoras de la velocidad del viento para realizar el cálculo.

El sistema informa la ampacidad de la línea como la menor de las ampacidades calculadas por cada sensor instalado. El método de cálculo utilizado es el recomendado por CIGRE [9].



Fig. 3: Posición del sensor 3 del sistema, ubicado en un punto donde la línea atraviesa un bosque

### 3.3. SISTEMA 3 (DATOS SATELITALES 1)

El tercer sistema, es un software comercial que utiliza únicamente estimaciones satelitales de las condiciones atmosféricas a lo largo de toda la traza de la línea para realizar el cálculo de ampacidad. En este caso, el proveedor indica que la granularidad de las medidas utilizadas es de 90 x 90 metros.

Si bien los datos de las variables atmosféricas son quinceminutales, el software implementado actualmente informa las medidas de ampacidad con una cadencia horaria.

El método de cálculo utilizado para el cálculo de ampacidad es una variante del método recomendado por CIGRE [9]. El fabricante no ha explicitado cual es la variante implementada.

El software es flexible y permite realizar las modificaciones o consideraciones que se crean convenientes.

### 3.4. SISTEMA 4 (DATOS SATELITALES 2)

El cuarto sistema, también es un software comercial que utiliza estimaciones satelitales de las condiciones atmosféricas a lo largo de toda la traza de la línea y permite tomar en cuenta la información de estaciones meteorológicas locales para complementar su cálculo de ampacidad. En el caso de esta prueba piloto se utilizaron únicamente los datos de la EM1.

La granularidad de las estimaciones de las variables atmosféricas son de 10 x 10 km.

El sistema reporta la ampacidad con una cadencia quinceminutal.

<sup>2</sup> Despacho de Cargas del Uruguay



El método de cálculo utilizado es el método recomendado por CIGRE [9].

#### 4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Los sistemas instalados monitorean simultáneamente la línea desde octubre 2021 y se tomó como referencia un año móvil para realizar la comparación de las medidas (15 de noviembre del 2021 al 14 de noviembre del 2022).

El cálculo de ampacidad de los diferentes sistemas puede tener diferentes cadencias y estampas de tiempo, por lo tanto, para la comparación se realizó una interpolación lineal entre dos puntos consecutivos de cada uno de ellos. La comparación de datos se realizó tomando una muestra cada 5 minutos.

El sistema que utiliza sensores físicos, tuvo algunos períodos en que no se reportaron datos, principalmente por fallas en la configuración de los sistemas de comunicación que luego fueron resueltos. Estos períodos, fueron eliminados de la comparación de medidas, y no se considera que signifiquen un cambio en las conclusiones obtenidas.

En la Fig. 4 y Fig. 5 se muestra el porcentaje del tiempo en que cada sistema reportó medidas de ampacidad por encima del 100% y 130% de la ampacidad estática de la línea monitoreada respectivamente, en cada uno de los meses del período analizado. El último grupo de barras de cada gráfico, muestra la estadística de cada sistema para todo el año de estudio.

Como primera observación, hacemos notar el cambio en el comportamiento del sistema que utiliza estaciones meteorológicas para realizar el cálculo de ampacidad a partir del mes de abril. Este cambio, se debe a la modificación en la metodología de cálculo mencionada anteriormente en 0. En la Fig. 6, se presenta la rosa de vientos de las estaciones meteorológicas utilizadas para el cálculo durante el período de estudio, que muestra que el viento es mayormente colineal con el conductor, explicando el cambio drástico en el comportamiento del sistema antes y después de la modificación del algoritmo de cálculo.

Por otra parte, podemos observar que todos los sistemas reportan una ampacidad mayor a la ampacidad estática de la línea durante la mayor parte del período de estudio (oscilando entre el 55%<sup>3</sup> y 95% del tiempo). Cuando comparamos los cálculos reportados por cada sistema contra el 130% de la ampacidad estática, se observa que los sistemas con datos satelitales muestran valores mayores a este porcentaje del rate estático durante una mayor parte del tiempo que los dos restantes, mostrando valores superiores al 130% de la ampacidad estática durante aproximadamente el 60% del tiempo del período analizado (ver Fig. 5).

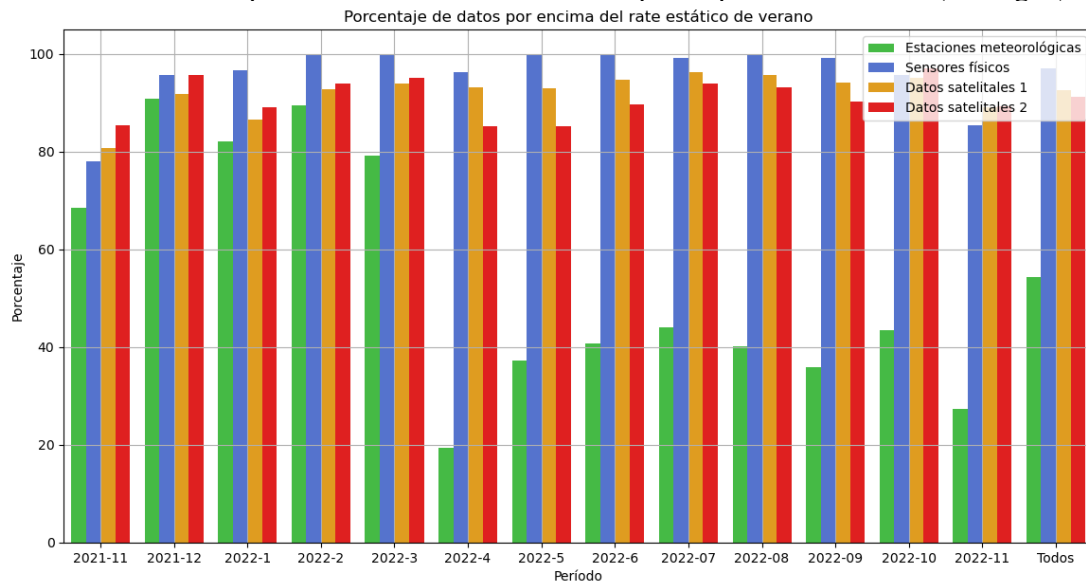


Fig. 4: Porcentaje del tiempo que el sistema calculó una ampacidad superior a la ampacidad estática de la línea durante el período de análisis.

<sup>3</sup> Se debe tener en cuenta que el sistema que utiliza estaciones meteorológicas tuvo un cambio en la metodología de cálculo durante el período analizado, por lo que la estadística en este caso es solo representativa.

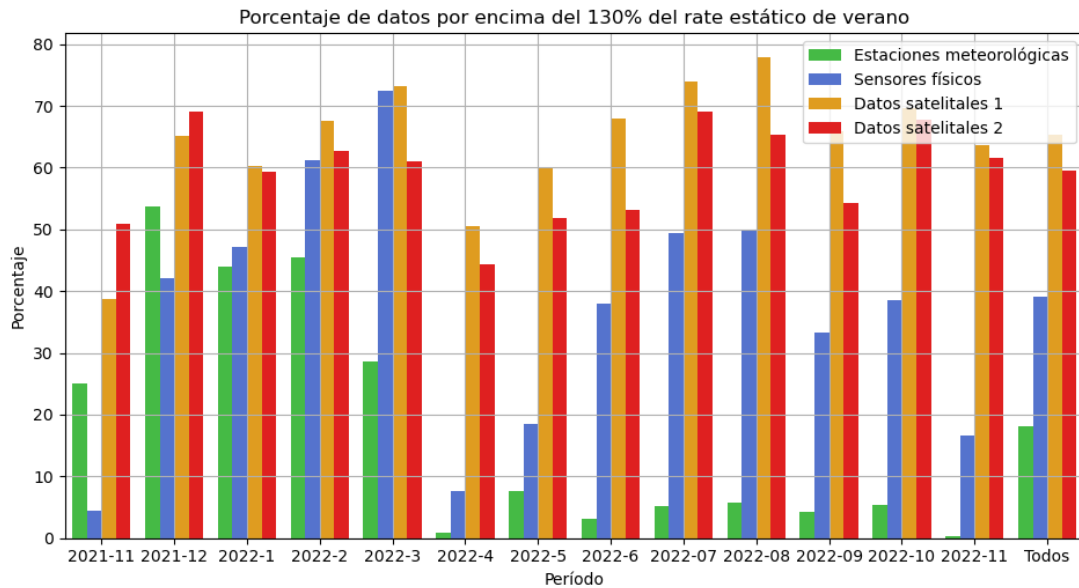


Fig. 5: Porcentaje del tiempo que el sistema calculó una ampacidad superior al 130% de la ampacidad estática de la línea durante el período de análisis.

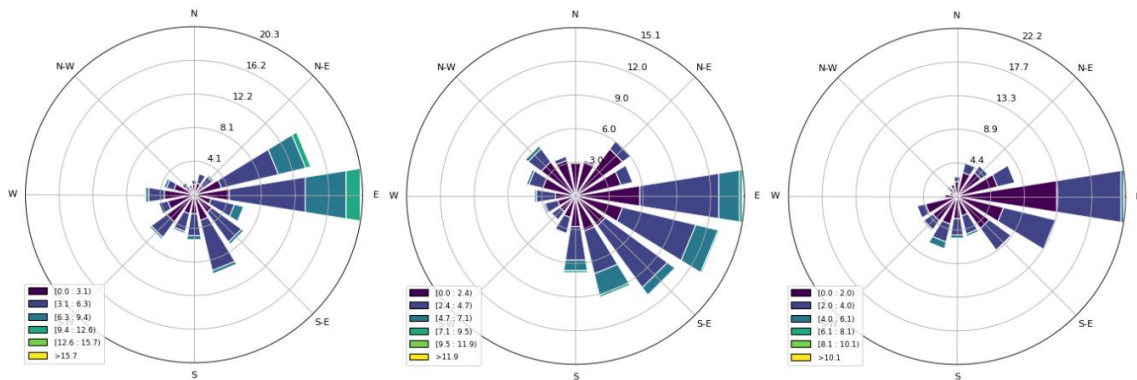


Fig. 6: Rosa de viento de las estaciones meteorológicas utilizadas (EM1 a EM3 de izquierda a derecha respectivamente).

En los sistemas implementados se han utilizado las variables atmosféricas medidas o estimadas sin aplicar factores de atenuación. Otros transmisores han optado por tomar valores conservadores para las medidas de las variables atmosféricas, principalmente en lo que refiere a la velocidad del viento o su ángulo de incidencia respecto del conductor [3] [10]

En la Fig. 7, se muestra el histograma acumulado para cada uno de los sistemas durante el invierno y el verano. En línea punteada se indica la ampacidad estática de la línea monitoreada en cada uno de los períodos.

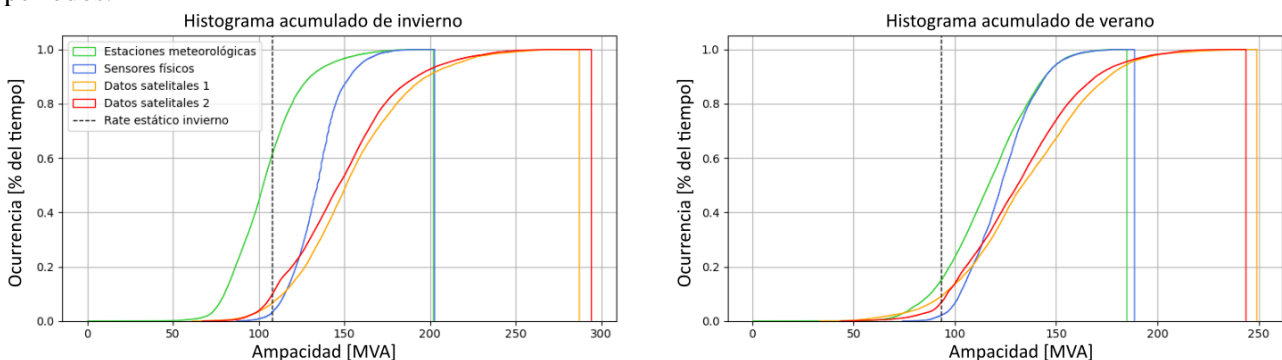


Fig. 7: Histogramas de ampacidad reportada por cada sistema separados por verano (diciembre a marzo) e invierno (abril a noviembre).

A partir de los histogramas acumulados, podemos observar un comportamiento estadístico similar entre los dos sistemas que utilizan datos satelitales para realizar el cálculo de ampacidad y distanciado de los otros dos sistemas.

Por otra parte, en verano (período en que el sistema que utiliza estaciones meteorológicas tomaba un ángulo de incidencia fijo de 90° del viento con el conductor) el sistema que utiliza estaciones meteorológicas tiene un comportamiento similar al que utiliza sensores físicos. Luego del cambio en el algoritmo, respecto del modo en que se considera el ángulo de incidencia del viento con el conductor, estos sistemas muestran un comportamiento estadístico diferente, siendo el de estaciones meteorológicas el estadísticamente más conservador de ambos.

En la Fig. 8 se muestra otra representación de los cálculos obtenidos con cada sistema clasificados por época del año (verano e invierno), en la cual se puede apreciar la similitud entre los cálculos realizados por los dos sistemas que utilizan datos satelitales.

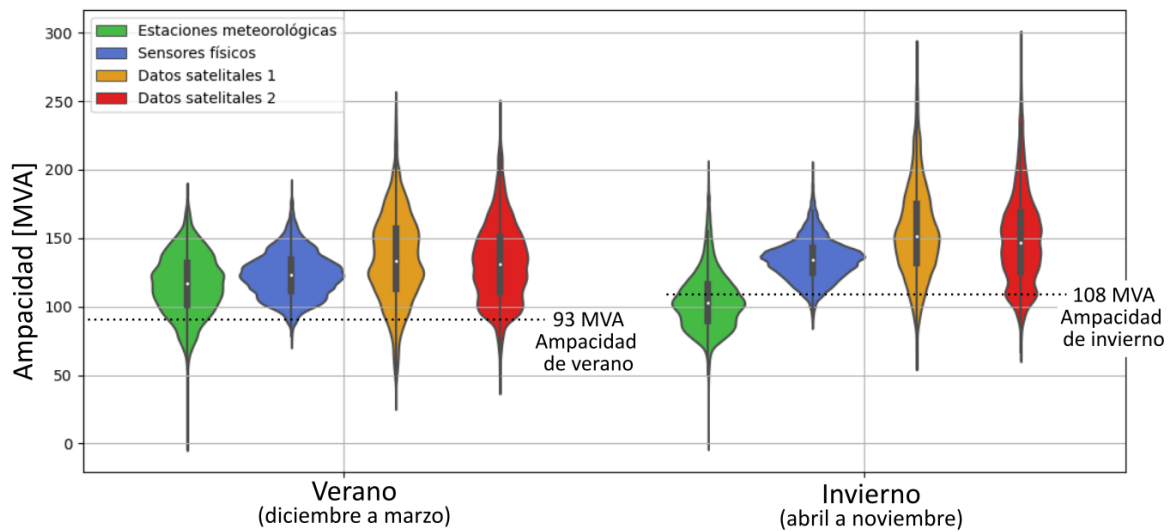


Fig. 8: Gráfico de violín para todos los sistemas clasificados por época del año (verano - invierno)

Más allá de las similitudes estadísticas que pueda haber entre algunos de los sistemas, es importante notar que la ampacidad de la línea debe ser controlada en tiempo real y, por lo tanto, la comparación de los resultados en un mismo instante de tiempo es determinante. En la Fig. 9, se puede ver que durante un período largo de tiempo los cálculos reportados instantáneamente por cada sistema son muy diferentes entre sí. En este caso, se muestra que por un período de más de 48hs, las estimaciones de los sistemas que utilizan datos satelitales son muy optimistas con respecto a las estimaciones realizadas por los otros sistemas. Durante estas horas, mientras que los dos sistemas que utilizan datos satelitales estimaron una ampacidad superior a los 200 MVA y alcanzando los 280 MVA, los otros reportaron estimaciones que rondaban los 160 MVA y no superaron los 190 MVA.

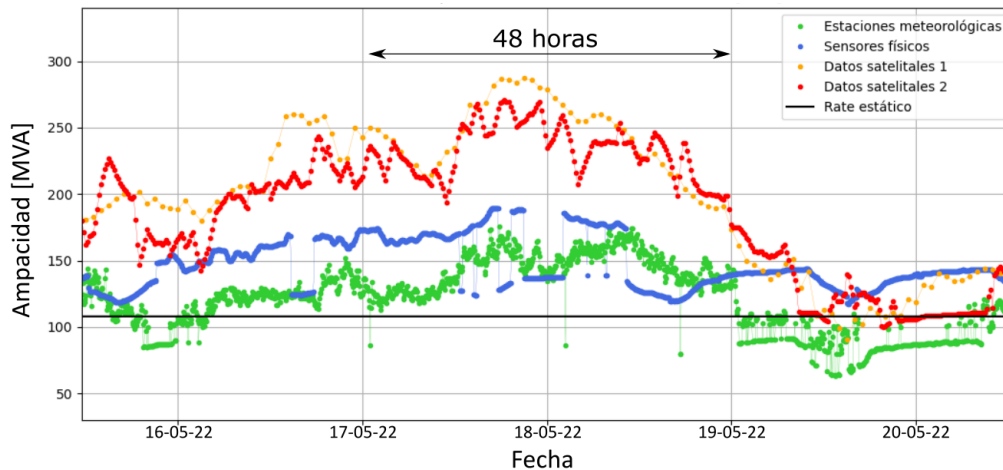


Fig. 9: Ampacidad reportada por los 4 sistemas para los días 16 a 19 de mayo 2022.

Actualmente se están contrastando las estimaciones de las variables atmosféricas de los proveedores satelitales contra las mediciones obtenidas por las estaciones meteorológicas locales.

## 5. CONCLUSIONES

Los tres sistemas comerciales reportaron una ampacidad mayor a la ampacidad estática clásicamente utilizada en UTE durante más del 90% del tiempo. Esta ampacidad, también es superada por encima del 120% durante más del 65% del tiempo en todos los casos y por encima del 130% durante al menos el 39% del tiempo en el sistema con reportes más conservadores.

A partir de estos resultados, se concluye que hay un gran margen de capacidad remanente en la línea monitoreada, por lo que la utilización de estas tecnologías puede resultar en una operación más flexible y un mejor aprovechamiento de la infraestructura ya instalada evitando o postergando la construcción de nuevas líneas. Se observa que el sistema de estaciones meteorológicas, luego del cambio en la consideración del ángulo de incidencia del viento, ha reportado valores significativamente más bajos que los demás sistemas. Este sistema se está analizando y se seguirá ajustando.

Por otra parte, no hay que ignorar que hay un 10% del tiempo, que los sistemas informan una ampacidad más restrictiva que la actualmente utilizada.

A partir de los datos analizados, se puede decir que en general el sistema de sensores físicos y de estaciones meteorológicas reportaron una menor ampacidad que los sistemas que utilizan datos satelitales. También, pudo concluirse que los reportes de los sistemas con datos satelitales, presentan una mayor excursión en su ampacidad reportada respecto de los sensores físicos considerando períodos cortos de 3-4 hs.

Esto puede explicarse debido a que el sensor físico considera intrínsecamente el fenómeno de inercia térmica del conductor, que actuaría como filtro a las fluctuaciones bruscas de las variables meteorológicas.

A partir de los histogramas acumulados, podemos observar un comportamiento estadístico similar entre los dos sistemas que utilizan datos satelitales para realizar el cálculo de ampacidad y distanciado de los otros dos sistemas. Sin embargo, al momento de comparar los resultados para los mismos instantes temporales, se encuentran grandes diferencias entre los resultados de los diferentes sistemas.

Durante el 2023 se seguirán analizando las medidas junto con los proveedores de los sistemas, a efectos de definir con más precisión cuáles son los motivos principales que justifican las diferencias encontradas.

## 6. REFERENCIAS

- [1] IEEE, «NESC. National electrical safety code,» 2007.
- [2] IEEE, «Std 738. Standard for calculating the current-temperature of bare overhead conductors,» 2006.
- [3] CIGRE, «TB 299. Guide for selection of weather parameters for bare overhead conductor ratings (WG B2.12),» 2006.
- [4] Lakota, Gašper & Kosmac, Janko & Marinšek, Miran & Barl, Boštjan & Kostevc, Jan, «Comparison of overhead conductor temperature measurements and estimations acquired from multiple systems installed on a single overhead line,» 2013.
- [5] Puffer, Ralf & Schmale, Michael & Rusek, Bartosz & Neumann, Claus & Scheufen, Martin, «Area-wide dynamic line ratings based on weather measurements.,» 2012.
- [6] Soheila Karimi, Petr Musilek, Andrew M. Knight, «Dynamic thermal rating of transmission lines: A review,» 2018.
- [7] J. Teh et al, «Prospects of Using the Dynamic Thermal Rating System for Reliable Electrical Networks: A Review,» *IEEE Access*, vol. 6, n° 26765-26778, 2018.
- [8] Erdinç, F.G.; Erdinç, O.; Yumurtacı, R.; Catalão, J.P.S., «A Comprehensive Overview of Dynamic Line Rating Combined with Other Flexibility Options from an Operational Point of View,» *Energies*, vol. 13, 2020.
- [9] CIGRE, «TB 601. Guide for thermal rating calculations of overhead lines (WG B2.43),» 2014.
- [10] K. reich OVE, G. Mika, R. Puffer, «Potential analyses for dynamic rating optimization on basis of four years of operational experience in Austria,» 2018.
- [11] CIGRE, « TB 207. Thermal Behaviour of overhead conductors (WG 22.12),» 2002.