



**CENTRA**  
CENTER FOR ENERGY TRANSITION  
UNIVERSIDAD ADOLFO IBÁÑEZ



**Cátedra de Investigación CENTRA - ACESOL**

# **Análisis y Herramientas para la Integración Eficiente de Recursos Energéticos Distribuidos en Chile**

**Informe de Avance 1:**

**Revisión de experiencias internacionales en el uso de  
herramientas para la integración eficiente de recursos  
energéticos distribuidos.**

Santiago, 11 de mayo de 2022

### Información del Documento

<b>Preparado para</b>	Asociación Chilena de Energía Solar AG (ACESOL)
<b>Dirección</b>	Napoleón 3233, Las Condes, Santiago.
<b>Proyecto</b>	Cátedra de Investigación CENTRA-ACESOL
<b>Responsable del proyecto</b>	Daniel Olivares – Director CENTRA
<b>Correo electrónico</b>	daniel.olivares@uai.cl
<b>Fecha</b>	4 de mayo de 2021
<b>Equipo de trabajo</b>	Bernardo Severino, Investigador CENTRA Luis Gutiérrez, Profesor Asistente FIC-UAI Daniel Olivares, Profesor Asociado FIC-UAI

Daniel Olivares Quero  
Director  
UAI Center for Energy Transition (CENTRA)  
Universidad Adolfo Ibáñez

## **Tabla de Contenidos**

Definiciones	<b>4</b>
Introducción	<b>6</b>
Experiencias internacionales	<b>7</b>
Distribution Network Visibility (Reino Unido)	<b>8</b>
Key Decisions for Hosting Capacity Analysis (IREC, EE. UU.)	<b>10</b>
Distributed Energy Resources Hosting Capacity Study (Australia)	<b>12</b>
Low Voltage Networks Solutions (Reino Unido)	<b>14</b>
Flexible Plug and Play (UK Power Networks, Reino Unido)	<b>16</b>
Conclusiones	<b>18</b>
Metodología	<b>19</b>
Referencias	<b>21</b>

## 1 Definiciones

<b>Término</b>	<b>Definición</b>
Cambiador de Tomas Bajo Carga (OLTC, On-Load Tap Changer)	Mecanismo que permite variar la relación de vueltas en un transformador sin interrupción del suministro, posibilitando la regulación de voltaje en el devanado secundario.
Capacidad de Alojamiento (HC, Hosting Capacity)	Capacidad total de recursos energéticos distribuidos que se puede conectar a la red de distribución antes de que se requieran cambios de control o reforzamientos.
Capacidad de Transmisión Dinámica (DLR, Dynamic Line Rating)	Tecnología diseñada para maximizar el uso de la capacidad de transporte de corriente de una línea en función del monitoreo de las condiciones ambientales.
Control Automático de Tensión (AVC, Automatic Voltage Control)	Sistema de control que permite mantener la tensión de la subestación en un nivel constante y dentro de los límites adecuados de operación.
Estándar IEC 61850	Estándar industrial que define una serie de protocolos de comunicación entre los distintos dispositivos de subestaciones eléctricas.
OpenDSS	Software para la simulación de sistemas de distribución de energía eléctrica, especializado en la modelación de recursos energéticos distribuidos.
Recursos Energéticos Distribuidos (DERs, Distributed Energy Resources)	Demandas controlables y tecnologías de generación y almacenamiento de energía, modulares, de pequeña escala, y cercanas a los lugares de consumo.
Regla Prorratio	Regla que el recorte total de generación se reparte entre los generadores distribuidos conectados a la red de forma proporcional a su capacidad instalada.
Regla Último en Entrar Primero en Salir (LIFO, Last-In-First-Out)	Regla en que el recorte total de generación parte con el último generador distribuido conectado a la red.
Regulador de Baja Tensión (LVR, Low Voltage Regulator)	Dispositivo que usa un transformador controlable para aumentar o disminuir la tensión en una línea de baja tensión.
Relé de Protección	Dispositivo eléctrico que se usa para proteger circuitos, equipos y operadores de una variedad de

	condiciones eléctricas indeseables cortando la energía del circuito cuando se detecta una falla.
Sistema de Información Geográfica (GIS, Geographic Information System)	Conjunto de herramientas que permiten la organización, almacenamiento, manipulación, análisis y modelización de datos que están vinculados a una referencia espacial.
Transformador Desfasador	Tipo especial de transformador que se utiliza para regular la transferencia de potencia entre dos puntos mediante la regulación de ángulo de desfase entre los extremos.
Unidad Terminal Remota (RTU, Remote Terminal Unit)	Dispositivo electrónico basado en microprocesadores que permite obtener señales de un proceso y enviar los datos a un sitio remoto donde se procesen.

## 2 Introducción

En el marco de la política energética de largo plazo, el país se ha propuesto como objetivo alcanzar una matriz energética sostenible, resiliente y carbono neutral. Para lograr este objetivo se requiere una rápida integración de generación renovable en las próximas décadas, así como asegurar que el sistema eléctrico cuente con la flexibilidad necesaria para integrar estas tecnologías de manera segura y eficiente. En este contexto, la política energética de largo plazo ha establecido como uno de sus objetivos fomentar la generación distribuida y el autoconsumo [1]. Más aún, la evidencia acumulada tanto en Chile como a nivel mundial es clara respecto de los beneficios del desarrollo eficiente de los recursos energéticos distribuidos [2, 3].

El cambio de paradigma desde un sistema eléctrico centralizado, basado en centrales de generación de gran escala, hacia uno con una presencia significativa de recursos de generación distribuida plantea diversos desafíos técnicos y regulatorios. En particular, esta transformación puede conllevar a una operación de las redes de distribución más cercana a sus límites operacionales o a problemas en la calidad de suministro. En este contexto, se ha reconocido a nivel internacional la necesidad de desarrollar herramientas para la integración eficiente de recursos distribuidos [3]. Entre estas herramientas se encuentra el análisis de capacidad de alojamiento, visualización de red, generación de escenarios futuros y control dinámico de recorte de generación. Estas herramientas contribuyen a una mayor transparencia respecto de la capacidad y los costos de red para alojar recursos energéticos distribuidos, lo que permitiría una mejor toma de decisiones de inversión.

A nivel internacional, se han reportado en los últimos años experiencias en la implementación de herramientas para la integración eficiente de recursos energéticos distribuidos, generando evidencia de los beneficios de su utilización. Además, de estas experiencias se rescatan aprendizajes significativos para nuevos proyectos que busquen implementar herramientas similares. En el presente informe se describen experiencias internacionales relevantes para la ejecución del proyecto de investigación aplicada. Se consideran cinco experiencias, las cuales abarcan estudios de capacidad de alojamiento, herramientas de visualización de red y experiencias en la aplicación de control dinámico de recorte de generación.

### 3 Experiencias internacionales

La siguiente tabla resume las experiencias industriales internacionales seleccionadas para este reporte. Ellas corresponden a proyectos de desarrollo e implementación de herramientas de análisis para la integración eficiente de recursos energéticos distribuidos. Además, se incluye un estudio de análisis de la implementación de este tipo de herramientas en EE. UU.

Los países en donde estos proyectos se llevaron a cabo están a la vanguardia en temas de objetivos de penetración y regulación de recursos distribuidos. En general, se tratan de proyectos con financiamiento público/privado, en donde la parte pública corresponde a programas gubernamentales para el fomento de la adopción de tecnologías de generación bajas en carbono.

Nombre Proyecto	País	Institución	Año	Costo	Área del Proyecto
Distribution Network Visibility	UK	UK Power Networks	2011 - 2012	£2,89M	Visualización y análisis de datos de redes de distribución
Key Decisions for Hosting Capacity Analysis	EE. UU.	Interstate Renewable Energy Council	2021	-	Capacidad de alojamiento: Experiencias de estudios en EE. UU.
Distributed Energy Resources Hosting Capacity Study	Australia	CitiPower y Powercor	2018 - 2020	US\$353k	Capacidad de alojamiento y soluciones para integración PV
Low Voltage Networks Solutions	UK	Electricity North West LV	2011- 2013	£1,5M	Capacidad de alojamiento y soluciones para integración de DERs
Flexible Plug and Play	UK	UK Power Networks	2011 - 2014	£9,7M	Control activo de generadores distribuidos

Tabla 1. Resumen de las experiencias industriales internacionales.

### 3.1 Distribution Network Visibility (Reino Unido)

#### Objetivo y resultados logrados

El objetivo de este proyecto fue demostrar los beneficios de la adquisición, utilización y visualización de datos de la red de distribución. Como resultado principal, el proyecto desarrolló una aplicación web con un conjunto de herramientas de visualización y análisis de datos de redes de distribución.

#### Descripción del proyecto

El proyecto Distribution Network Visibility [4] fue liderado por la distribuidora eléctrica UK Power Networks y financiado parcialmente a través del programa gubernamental “Low Carbon Networks Fund Tier 1”. En el marco de este proyecto, se desarrolló el sistema de Visualización de la Red de Distribución (DNV, por su sigla en inglés), cuya arquitectura se observa en la Figura 1. El sistema considera un servidor en donde se alojan la información y los datos operaciones de los equipos que constituyen la red de distribución. Además, se incluye un módulo de depuración de datos, que como se explicará más adelante, es fundamental para una correcta implementación de la herramienta. Los clientes pueden acceder a los datos, su visualización y las herramientas de análisis mediante una aplicación web desarrollada en Silverlight de Microsoft. La herramienta cuenta con algoritmos dedicados al análisis y clasificación de cargas, al modelamiento de temperatura de transformadores y subestaciones a partir de datos climáticos, a la detección de conexión de grandes generadores y cargas, a la detección de desbalance de voltaje y corriente, entre otros. En la actualidad esta aplicación es utilizada por varias unidades de negocio de UK Power Network.

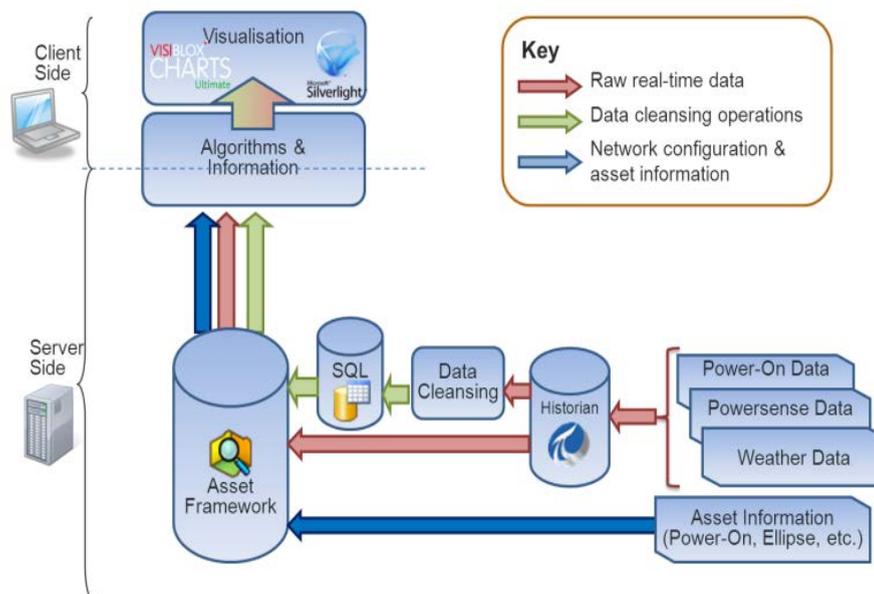


Figura 1: Arquitectura del sistema de visualización de la red de distribución.

Uno de los principales desafíos del proyecto fue la obtención de datos y asegurar su calidad. Con el fin de maximizar las capacidades de monitoreo, el proyecto actualizó cerca de 10.000 Unidades Terminales Remotas (RTU), permitiendo la incorporación de 11 nuevas mediciones de red por RTU, en adición a las 4 antes existentes. Los nuevos datos abrieron la posibilidad de desarrollar nuevas herramientas para el análisis de redes de baja tensión. Sin embargo, a medida que el proyecto avanzaba y los usuarios empezaban a usar las aplicaciones en escenarios realistas, se fue evidenciando que la calidad de los datos era extremadamente importante para asegurar la confianza de las herramientas desarrolladas. Se evidenció que los datos operacionales contenían diferentes anomalías tales como datos faltantes, datos constantes por mucho tiempo, o saltos repentinos. Para estos casos se desarrollaron herramientas para depurar los datos, permitiendo completar datos faltantes o erróneos a partir de otros datos de la red. Adicionalmente, mediante la aplicación de reglas simples, como comprobar la ecuación  $S^2=P^2+Q^2$ , se pudo identificar y solucionar problemas con respecto al funcionamiento o instalación de sensores.

Adicional a la aplicación web de visualización y análisis de datos de red, el proyecto se enfocó en la identificación de los potenciales beneficios de su uso por parte de UK Power Networks. El proyecto detectó 10 beneficios de usar la herramienta de visualización y análisis de datos de la red, cuyo impacto comercial total fue estimado en 1,1 millones de libras. Los beneficios identificados al inicio del proyecto están relacionados con los siguientes módulos de la aplicación web:

- módulo de cálculo del flujo de potencia en tiempo real,
- módulo de prevención de fallas en baja tensión producto de fallas en alta tensión,
- módulo de detección de fallas o eventos en la red de baja tensión,
- módulo de investigación de perfiles de tensión,
- módulo de identificación de áreas con deficiente factor de potencia,
- módulo de identificación de desbalances y armónicos fuera de norma,
- módulo de información para guiar conexión de nuevos clientes (cargas) y reforzamiento general del sistema,
- módulo de análisis de carga y crecimiento de demanda para mejorar procesos de planificación,
- módulo de mejoramiento de ventilación de las subestaciones, y
- módulo de reducción de riesgos de falla de cambiadores de tomas en transformadores.

Con respecto al módulo de investigación de perfiles de tensión, la aplicación puede ser usada para obtener reportes de las estaciones con niveles de tensión que excedan los límites por un determinado tiempo, definido por el usuario. El reporte identifica el porcentaje de tiempo en que la tensión estuvo por fuera de los límites y si aquello fue consecuencia de una variación de carga. Esta herramienta permite a los ingenieros identificar y entender las causas de problemas de baja y alta tensión mediante una rápida evaluación de los datos históricos de la tensión en transformadores y sus perfiles de carga. También asiste a ingenieros de planificación para la elaboración de planes de reforzamiento de red. Así, esta herramienta puede ser utilizada como base para el estudio de los impactos asociados a la conexión de recursos energéticos distribuidos.

## 3.2 Key Decisions for Hosting Capacity Analysis (IREC, EE. UU.)

### Objetivo y resultados logrados

El objetivo de este proyecto fue recopilar y analizar las experiencias de diferentes empresas de distribución eléctrica en EE. UU. que hayan implementado herramientas para el estudio de la capacidad de alojamiento de sus redes. Como resultado principal, se creó un documento que guía la toma de decisiones al momento de llevar a cabo estudios de capacidad de alojamiento.

### Descripción del proyecto

A partir de la experiencia de diferentes empresas de distribución en EE. UU., el Interstate Renewable Energy Council (IREC) [5] identificó una serie de decisiones relevantes que se deben tomar al momento implementar un estudio de capacidad de alojamiento. Estas decisiones fueron sistematizadas en los siguientes temas: proceso de participación de actores interesados, casos de uso, estrategia de implementación, metodología de cálculo, estrategia para actualización de resultados ante cambios del sistema, tipo datos de salida, tipo de recursos distribuidos a considerar, granularidad de los resultados, restricciones operacionales a considerar, protección de datos, validación de datos, e información en la manual de usuario. A continuación, se describen las alternativas identificadas respecto de casos de uso y la metodología de cálculo.

El IREC identifica tres tipos de casos de uso del análisis de capacidad de alojamiento, los cuales son explicados a continuación:

- **Caso de uso para la conexión de recursos energéticos distribuidos:** El análisis de capacidad de alojamiento puede ser usado para guiar a los clientes a determinar puntos de conexión con suficiente capacidad. El análisis también puede entregar los periodos de tiempo en donde se violan ciertas restricciones de operación, permitiendo al cliente evaluar un esquema de conexión flexible. Desde el punto de vista del operador del sistema, este caso de uso permite identificar cuándo un proyecto requiere de estudios adicionales para su conexión.
- **Caso de uso para determinar planes de reforzamiento:** El análisis de capacidad de alojamiento permite identificar alimentadores que deben ser reforzados para aceptar nuevos recursos energéticos distribuidos. Estos planes pueden ser integrados en la plataforma de visualización para mostrar la capacidad de alojamiento futura en función de escenarios de penetración de generación distribuida y crecimiento de demanda.
- **Caso de uso para determinar el valor de alojar recursos distribuidos:** Los recursos energéticos distribuidos traen diferentes beneficios en función del lugar en donde se les conecte. Así, cuando se determina el valor potencial del lugar de conexión los operadores del sistema de distribución pueden dar incentivos para la ubicación óptima de recursos distribuidos. Sin embargo, IREC reporta que aún no hay un consenso sobre la metodología y las suposiciones que respaldan dicho análisis.

Estrechamente relacionado con el caso de uso está la determinación de la metodología usada para calcular la capacidad de alojamiento. Todos los métodos aquí descritos se basan en el cálculo de flujo de potencia para determinar los valores de voltajes y corrientes en una red de distribución. A continuación, se presenta una descripción de los métodos para el cálculo de la capacidad de alojamiento:

- **Método determinístico (o iterativo):** de forma iterativa se simula el flujo de potencia para valores incrementales de tamaño (potencia instalada) del recurso distribuido conectado a un nodo de la red. El proceso iterativo termina cuando se alcanzan los límites operacionales de la red, siendo el último resultado de potencia instalada el valor de la capacidad de alojamiento para dicho nodo. Este proceso iterativo se realiza para cada nodo de la red, considerando que en el resto de los nodos no hay nuevos generadores distribuidos. Cabe tener en cuenta que la potencia del recurso energético puede ser considerada constante o variable en el tiempo, en cuyo caso el consumo de tiempo computacional aumenta considerablemente. No obstante, este método es adecuado para el caso de uso para conexión, debido a la precisión de los resultados.
- **Método estocástico:** en este método el tamaño y la ubicación del recurso energético distribuido se consideran variables aleatorias por lo que se usa un enfoque de flujo de potencia probabilístico. Los pasos generales en un flujo de potencia probabilístico son: crear muestras de las variables aleatorias, luego correr un flujo de potencia para cada muestra, y finalmente determinar para cuáles muestras no se violan los límites operacionales. Hay varios métodos para la generación de muestras de variables aleatorias, siendo el de Monte Carlo el más usado. Al usar este método los valores obtenidos son rangos de capacidad de alojamiento. Dado que menos simulaciones son realizadas, en comparación con el método determinístico, es factible explorar escenarios futuros de demanda y penetración de DERs. De este modo, el método probabilístico es el más indicado para procesos de planificación de reforzamientos de red.
- **Método “Streamlined”:** corresponde a una técnica heurística desarrollada por Electric Power Research Institute (EPRI) e implementada en la herramienta DRIVE. Este método puede ser pensado como una versión mejorada del método estocástico, en donde en vez de simular un gran número de escenarios se simula un número reducido de escenarios para calcular una estimación de la capacidad de alojamiento. Los escenarios y las heurísticas empleadas están basadas en estudios previos de tendencias de conexión de recursos energéticos distribuidos en la red de distribución bajo estudio. Distribuidoras eléctricas como New York Joint y Xcel Energy<sup>1</sup> en Minnesota usan este método en sus estudios de capacidad de alojamiento debido a que requiere menos tiempo computacional. Sin embargo, distribuidoras de California han mostrado que el uso de este método no es apropiado para ciertos casos de estudio.

---

<sup>1</sup> Xcel Energy ha reportado que el costo de adquirir DRIVE es de 250.000 dólares más 10.000 anuales. DRIVE no incluye herramientas para crear modelos de alimentadores. Xcel Energy usa Synergi para el modelamiento de alimentadores.

### 3.3 Distributed Energy Resources Hosting Capacity Study (Australia)

#### Objetivo y resultados logrados

El objetivo de este proyecto fue desarrollar una metodología replicable para evaluar la capacidad de alojamiento en redes de baja tensión y evaluar el desempeño técnico económico de diversas medidas para aumentar la capacidad de alojamiento. Como resultado principal, el estudio determina las mejores alternativas para aumentar la capacidad de alojamiento de generación fotovoltaica residencial.

#### Descripción del proyecto

El proyecto Distributed Energy Resources Hosting Capacity Study [6] fue liderado por la distribuidora de electricidad CitiPower y Powercor (CPPAL) y financiado parcialmente por la Agencia Australiana de Energías Renovables (ARENA). El proyecto se centró en las redes de distribución de CPPAL, en Melbourne y Victoria occidental. En esta área, se ha visto un aumento significativo de la capacidad instalada de paneles fotovoltaicos, experimentando un crecimiento de 16% en el año 2019. Además, la mayoría de los usuarios en el estado de Victoria tienen medidores inteligentes, lo que permitió acceso a los datos de consumo de electricidad de los usuarios en el marco de este proyecto.

Para evaluar la capacidad de alojamiento, se consideraron tres métricas: el porcentaje de penetración PV a partir del cual se activan restricciones de voltaje o el límite térmico de los equipos, el promedio anual de horas al día en que se activan restricciones de voltaje o de capacidad térmica en función de la penetración de PV, y el aumento en el voltaje máximo como función de la penetración de PV. La metodología propuesta para evaluar la capacidad de alojamiento se compone de cuatro pasos, descritos a continuación:

1. Categorizar las 80 mil redes de baja tensión (alimentadores) en base a su topología. Luego seleccionar 10 redes representativas para cada una de las categorías.
2. Construir un modelo de flujo de potencia para cada red representativa utilizando data de infraestructura de medición avanzada, data geoespacial y la información de la topología de la red.
3. Simular flujos de potencia para distintos niveles de penetración PV para un año de operación en pasos de 30 minutos.
4. Evaluar la capacidad de alojamiento en base a las tres métricas descritas en el párrafo anterior

Utilizando esta metodología se evaluó el desempeño técnico-económico de cinco alternativas de mitigación: tres de éstas son soluciones por parte de la red y dos por el lado de los usuarios. Entre las soluciones de red se consideraron la actualización o cambio de conductores de transformadores existentes, reemplazo de transformadores por transformadores con cambiador de tomas bajo carga (OLTC), e instalación de reguladores de baja tensión (LVR). Por el lado de los usuarios se consideró la instalación de inversores inteligentes para sistemas fotovoltaicos y la instalación de baterías. El desempeño técnico de las alternativas fue evaluado en base a la mejora observada en la capacidad de alojamiento de la red cuando la alternativa era considerada. El desempeño económico fue

evaluado utilizando un análisis costo beneficio, comparando el valor de la disminución en el recorte de generación fotovoltaica permitido por la alternativa de mitigación y su costo de inversión anualizado.

Por una parte, el estudio mostró que la alternativa de mitigación más eficiente era altamente sensible a las características locales de la red de distribución. Por otra parte, a nivel general, se observó que las soluciones de red eran más efectivas para aumentar el nivel de penetración de generación fotovoltaica a partir del cual se activan restricciones de tensión o de capacidad térmica de los equipos. Las soluciones de red también mostraron ser más efectivas en reducir el número de horas al día en que se activaban las restricciones para un mismo nivel de penetración PV. Por otro lado, los inversores inteligentes fueron la alternativa más efectiva para reducir el aumento de voltaje producto de un aumento en la penetración de generación PV. La instalación de baterías no resultó en un aumento en la capacidad de alojamiento de la red, ya que fueron operadas para maximizar el autoconsumo y no para prestar servicios a la red.

Además, basado en los resultados del estudio, se obtuvieron recomendaciones claves para el gobierno y la industria, de modo de permitir una integración más eficiente de recursos distribuidos. Por un lado, se recomienda permitir un límite de exportación flexible de generación distribuida (recorte dinámico de generación), ya que se observan horas en que la generación de los usuarios es recortada (producto del límite de exportación fijo) a pesar de no existir problemas en la red. En esta misma línea se propone promover e instalar inversores inteligentes en las áreas donde se espera un crecimiento en la capacidad instalada de sistemas fotovoltaicos. Se recomienda también explorar el potencial de las baterías para dar servicios a la red considerando distintas estrategias de operación y estructuras organizacionales para la coordinación de éstas. También se reconoce la necesidad de investigar los potenciales impactos positivos y negativos de vehículos eléctricos en la capacidad de alojamiento de las redes.

Finalmente, con respecto a la metodología usada para evaluar la capacidad de alojamiento, el proyecto identificó tres limitantes. La primera es que a partir de los resultados obtenidos de las redes modeladas es difícil sacar conclusiones para todos los tipos de alimentadores de CPPAL. La segunda limitación es que en el modelamiento no se consideró la capacidad de regulación de tensión del lado de alta tensión. Como consecuencia, los resultados obtenidos a partir del modelo son conservativos en términos del aumento de tensión. La tercera limitante es que el modelamiento no considera directamente los fenómenos de desbalance debido a la falta de información sobre la fase en que cada consumidor está conectado. Como consecuencia, los resultados son muy optimistas en términos de la capacidad de regulación de tensión de la red. Sin embargo, con el fin de mitigar este efecto, la metodología incluye un paso de post-procesamiento, que mediante el uso de datos de la operación real ajusta el modelo de forma de minimizar la diferencia de tensión observada entre el modelo y la operación real.

### 3.4 Low Voltage Networks Solutions (Reino Unido)

#### Objetivo y resultados logrados

El objetivo de este proyecto fue el monitoreo y modelamiento detallado de redes de baja tensión con el fin de aumentar el entendimiento de su desempeño, evaluar la capacidad de alojamiento, proponer soluciones para aumentar la integración DERs, y mejorar las proyecciones futuras de demanda y capacidad. El resultado principal de este proyecto fue la recolección de una valiosa y gran cantidad de datos operacionales en 200 subestaciones, cubriendo más de 1.000 alimentadores y habilitando un detallado proceso de modelamiento y análisis.

#### Descripción del proyecto

El proyecto Low Voltage Networks Solutions [7] fue liderado por la empresa de distribución del Reino Unido Electricity North West LV y financiado parcialmente a través del programa gubernamental “Low Carbon Networks Fund Tier 1”. Durante el 2012 y 2013 se instalaron equipos de monitoreo, desarrollados por las empresas GridKey y Nortech, para registrar la operación de los transformadores y la cabecera de cada alimentador de baja tensión de 200 subestaciones. La instalación se hizo sin interrumpir el suministro gracias a un innovador<sup>2</sup> proceso que incluía el uso de sensores especiales de corriente y voltaje. Los datos recopilados fueron entregados a la universidad de Manchester, quienes realizaron un detallado análisis del desempeño de las redes de Electricity North West. La evaluación consideró el nivel de carga de los transformadores, niveles de tensión de la subestación, nivel de desbalance, factor de potencia, corrientes por el neutro, y presencia de armónicos. En paralelo, la Universidad de Manchester también desarrolló modelos en OpenDSS para representar las redes bajo estudio. El modelo fue posteriormente validado usando datos operacionales. Usando estos modelos, la universidad de Manchester desarrolló un método estocástico para la evaluación de la capacidad de alojamiento basado en el enfoque de Monte Carlo. El método indica el porcentaje de clientes que puede conectar recursos energéticos distribuidos antes que algún límite operacional se active. El estudio de capacidad de alojamiento consideró generación fotovoltaica residencial (PV), bombas de calor (EHP), vehículos eléctricos (EV) y micro centrales de cogeneración. El método de análisis de capacidad de alojamiento también fue utilizado para estudiar el impacto de cambiadores de tomas bajo carga (OLTC), operación en anillo de redes y métodos tradicionales de reforzamiento de red.

Con respecto al desarrollo de los modelos de red, el proyecto destaca los siguientes aprendizajes claves. Primero, la modelación realista de las redes de baja tensión utilizando tres fases y el neutro permite dar cuenta de la naturaleza inherente del fenómeno de desbalance en redes. El desbalance puede tener efectos muy significativos en la cuantificación de los impactos asociados a la integración de recursos energéticos distribuidos. De hecho, el proyecto mostró que los modelos monofásicos subestiman los impactos de los recursos distribuidos en redes de baja tensión. Segundo, el análisis usando series de tiempo con resolución mínima de 10 minutos permite una mejor representación de las interacciones entre la demanda y los recursos distribuidos, y por lo tanto una mejor cuantificación del impacto de la generación distribuida durante el día. Los análisis

---

<sup>2</sup> Las empresas GridKey y Electricity North West fueron ganadoras del “2012 UK Energy Innovation Award” en la categoría “Best Smart Grid Technology” por la solución tecnológica de monitoreo ideada.

que usan series de tiempo con intervalos de tiempo mayor a 10 minutos subestiman los impactos en los niveles tensión y corriente, ver Figura 3. Por último, usando el método de Monte Carlo, se realizaron muchas simulaciones para dar cuenta de la diversidad e incertidumbres del comportamiento de los clientes, así como también de la localización, tamaño y operación de los recursos energéticos distribuidos. Esto permitió caracterizar de manera probabilística los impactos de los recursos distribuidos. De esta forma se mejora el proceso de toma de decisiones entregando información valiosa para el diseño de políticas regulatorias o de planificación de reforzamientos.

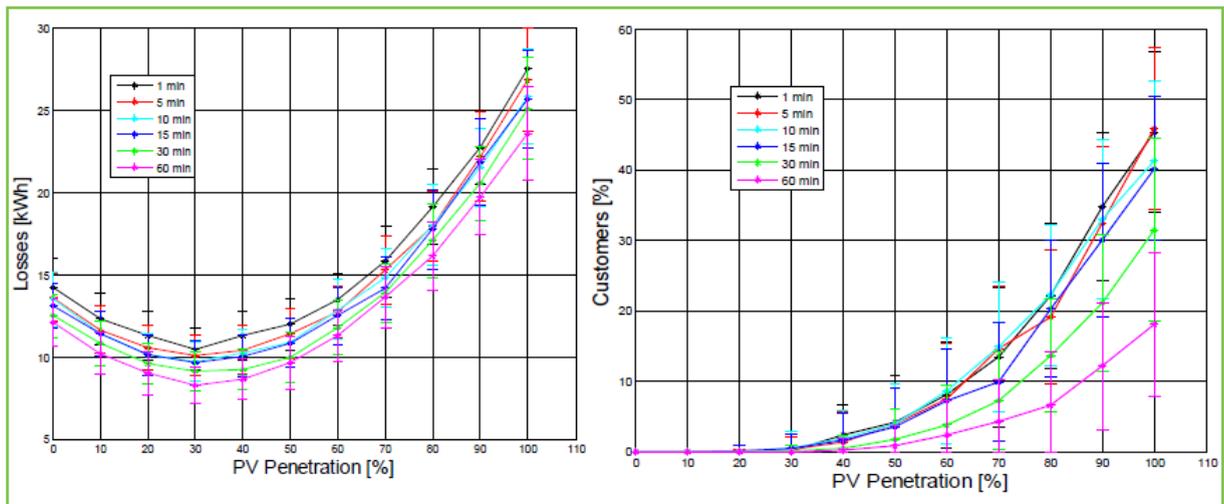


Figura 3: Ejemplo de la subestimación de impactos cuando se utiliza una resolución temporal de datos más baja. A la izquierda se muestran las pérdidas y a la derecha el porcentaje de usuarios con problemas de tensión, ambos a medida que aumenta la penetración PV.

Con respecto al impacto de la penetración de recursos distribuidos en las redes de distribución, el proyecto concluye lo siguiente. A medida que aumenta la penetración PV, los problemas de tensión son los primeros en surgir. Mientras que a medida que aumenta la penetración de vehículos eléctricos y las bombas de calor, se observan problemas por límites térmicos y de tensión. De hecho, el 35 % de los alimentadores llegan primero a sus límites térmicos para el caso de vehículos eléctricos. En el proyecto se identificó que el largo del alimentador y el número de clientes de la red se pueden utilizar para construir un estimador del desempeño de la red en presencia de recursos energéticos distribuidos. El proyecto propone utilizar este indicador para identificar cuáles alimentadores deben ser monitoreados, ya que tienen mayor probabilidad de presentar problemas.

### 3.5 Flexible Plug and Play (UK Power Networks, Reino Unido)

#### Objetivo y resultados logrados

El objetivo del proyecto fue idear soluciones tecnológicas y de mercado para facilitar una conexión más rápida y económica de generadores distribuidos sin la necesidad de incurrir en reforzamientos de red. Como resultado principal, el proyecto desarrolló un sistema para el control activo de generadores distribuidos, habilitando a los clientes a optar por contratos flexibles de operación.

#### Descripción del proyecto

El proyecto Flexible Plug and Play [8] fue liderado por UK Power Networks y financiado parcialmente a través del programa gubernamental “Low Carbon Networks Fund”. El proyecto seleccionó un sector rural del condado de Cambridgeshire como área de ensayo de estrategias para mejorar la capacidad de la red de distribución. Esta área fue seleccionada debido a su estrés en términos de capacidad de alojamiento. Al momento de iniciar el proyecto la red de distribución contaba con 90 MW de generación eólica instalada, 57 MW de generación aprobada para ser conectada, 34.5 MW de generación en revisión, y 97 MW de nuevas solicitudes de conexión. Adicionalmente, los elementos de la red eléctrica estaban alcanzando sus límites operacionales térmicos, de flujo inverso de potencia, y de tensión, imposibilitando la conexión a bajo costo de nuevos proyectos de generación distribuida.

Con el fin de reducir los costos y tiempos de conexión, el proyecto “Flexible Plug and Play” fue el primero que exploró el uso de conexiones flexibles por medio de contratos comerciales entre los usuarios y la empresa de distribución. Las conexiones flexibles permiten a los usuarios conectar generación distribuida aceptando que el operador de la red pueda controlar la potencia de generación en base a los límites operacionales de la red. Así, cuando se activa una restricción (típicamente en horarios de alta generación y baja demanda) se recorta la generación de los clientes flexibles siguiendo la regla Last-In-First-Out (LIFO) o de prorrateo, dependiendo del contrato comercial acordado previamente. El proyecto demostró que cuando los clientes toman en consideración los niveles de recortes de generación, el esquema de conexión flexible es una opción viable para la mayoría de ellos.

Bajo el marco de conexiones flexibles, el proyecto aceptó la conexión de 15 clientes, representado un total de 54.4 MW de generación distribuida conectada a diferentes niveles de tensión (33 kV, 11 kV y menor). Hasta el término de su ejecución, el proyecto ahorró a los clientes aproximadamente 36 millones de libras, si se compara con la alternativa de conexión “business-as-usual” la cual requiere invertir en reforzamiento de red o en rutas de cableado más largas. Además, se evidenció que el esquema de conexión flexible permitió reducir los tiempos de espera de conexión en un 57 % comparado con la conexión “business-as-usual”. En la actualidad, UK Power Network, a través del proyecto “Energy Exchange”, estudia diferentes soluciones de mercado que mejoren los esquemas de recorte de generación del tipo Last-In-First-Out o la regla de prorrateo.

El esquema de conexión flexible fue posible gracias al diseño e implementación de una solución tecnológica basada en tres componentes, ver Figura 2. Primero, una infraestructura de comunicaciones, basada en el estándar IEC 61850, para facilitar la integración de equipos de control y monitoreo distribuidos. Segundo, dispositivos inteligentes que permiten el control y monitoreo de la red. Los nuevos dispositivos inteligentes implementados en el marco del proyecto fueron los siguientes: Transformador Desfasador, Capacidad de Transmisión Dinámica (DLR), Nuevos Relés de Protección, Unidades Terminales Remotas (RTUs), y Control Automático de Tensión (AVC). Estos dispositivos inteligentes permiten levantar restricciones locales, liberando capacidad adicional para la conexión de nueva generación distribuida. Finalmente, el último componente de la solución tecnológica es un sistema de Gestión Activa de Red Centralizado. Haciendo uso de un sistema de Visibilidad de la Red de Distribución en tiempo real, el sistema de gestión centralizado computa el nivel de generación que puede ser soportada por red. Esta información es luego transmitida a los controladores locales de los generadores distribuidos de los clientes de forma de ejecutar los recortes de generación.

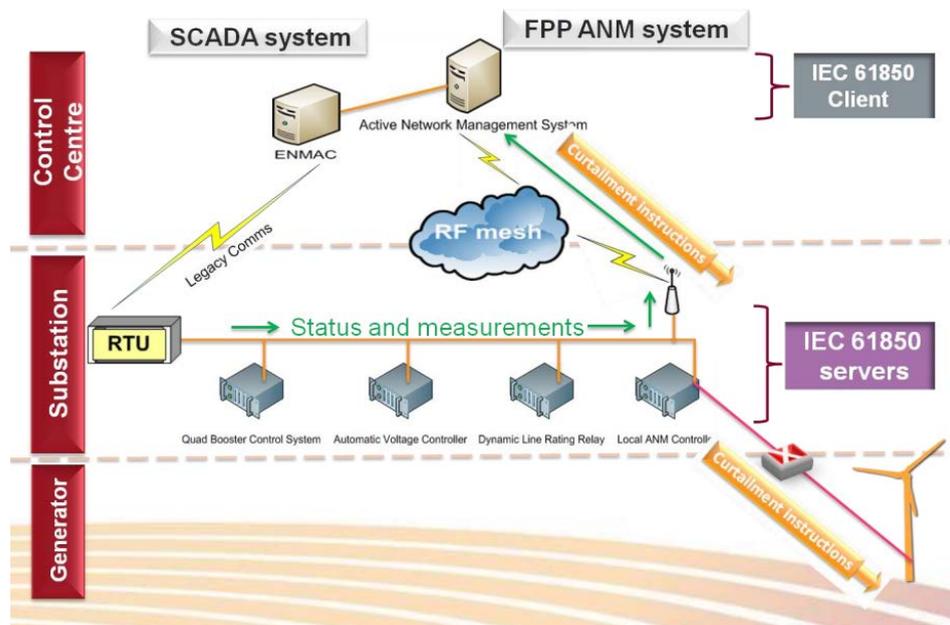


Figura 2: Diagrama de comunicaciones, control y componentes de la solución tecnológica.

Uno de los principales desafíos del proyecto fue el testeado y la integración de los diferentes equipos que componen la solución tecnológica. El proceso de integración de los equipos era un riesgo relevante que podía impactar tanto la calidad de la solución como sus tiempos de implementación. Para mitigar este riesgo, se construyó un laboratorio de testeado con el fin de llevar a cabo pruebas de interoperabilidad antes de instalar los componentes en terreno. Los diferentes dispositivos inteligentes pudieron ser probados de manera simultánea mediante el software de Gestión Activa de Red y Simuladores Digitales en Tiempo Real. Al término del proyecto se identificó como aprendizaje relevante que el contar con un laboratorio de testeado durante el ciclo de innovación fue beneficioso para la resolución de problemas, el testeado y el mejoramiento de las funcionalidades de la solución tecnológica.

## 4 Conclusiones

Se seleccionaron y describieron cinco experiencias internacionales relevantes sobre el desarrollo y aplicación de herramientas para la integración eficiente de recursos energéticos distribuidos. Estas experiencias son proyectos que en su mayoría han sido liderados por empresas de distribución eléctrica en conjunto con otras entidades, como universidades o centros de investigación, y en su mayoría financiados por fondos gubernamentales. Los proyectos seleccionados en este reporte cubren herramientas para la visualización de datos, el análisis de capacidad de alojamiento, y el control en tiempo real de recursos distribuidos, que están directamente relacionadas con algunos de los desafíos identificados para la industria de generación distribuida en Chile y con los resultados esperados de este proyecto de investigación industrial.

En específico, a partir de los proyectos examinados se extraen las siguientes conclusiones de interés para proyecto CII-CENTRA-ACESOL:

- **Involucramiento de todos los beneficiarios.** Aumentar la transparencia sobre los parámetros y condiciones operacionales de las redes de distribución es beneficioso para los diversos actores involucrados. Por parte del operador permite una mejor toma de decisiones en la operación y planificación de las redes. Por parte de los clientes permite disminuir los costos y tiempos de conexión, además de mayores grados de certidumbre en la operación. Por parte del regulador habilitan, entre otras cosas, el cumplimiento de las metas de integración de tecnologías bajas en carbono. En este contexto, resulta altamente deseable que el proyecto en etapas posteriores sea capaz de sumar como socios estratégicos y co-ejecutores a empresas de distribución eléctrica, el Ministerio de Energía, y la Superintendencia de Electricidad y Combustibles.
- **Validación de datos.** La fuente primaria en la cadena de generación de valor de una herramienta de análisis son los datos. Por lo mismo, se le debe poner atención en asegurar su calidad. En las experiencias estudiadas, se destinaron recursos importantes a la depuración y validación de los datos. Para un proceso exitoso de validación de datos se requiere un trabajo coordinado entre los operadores de los sistemas de distribución y el equipo a cargo del desarrollo de las herramientas de análisis.
- **Casos de uso.** Responder a para qué y cómo se utilizarán las herramientas de análisis y visualización es relevante para definir con claridad los datos requeridos y los métodos a desarrollar e implementar. Para el caso de estudio de la capacidad de alojamiento y la visualización de redes, los proyectos seleccionados entregan documentación bastante detallada para guiar la discusión; sin embargo, es necesario definir tempranamente casos de uso adicionales necesarios en el contexto nacional para que el diseño de las herramientas sea acorde a lo requerido.
- **Desafío y oportunidades.** Algunos proyectos indican en sus reportes la necesidad de mejorar las metodologías para el análisis de capacidad de alojamiento. En este sentido, aún existen desafíos por resolver para una integración eficiente de recursos energéticos distribuidos. Esta cátedra tiene la oportunidad de contribuir a mejorar las metodologías de modelamiento de redes y algoritmos para el cálculo de la capacidad de alojamiento en Chile.

## 5 Metodología

Para lograr los objetivos de la Cátedra de Investigación Industrial CENTRA-ACESOL, se propone desarrollar una **Plataforma Computacional** para el análisis de redes de distribución. A partir de la revisión de las experiencias internacionales presentada en este informe, se propone que las herramientas abarquen las áreas de estimación de variables operacionales, análisis de capacidad de alojamiento, y generación de escenarios. Sumado a esto se desarrollará una herramienta de visualización de resultados.

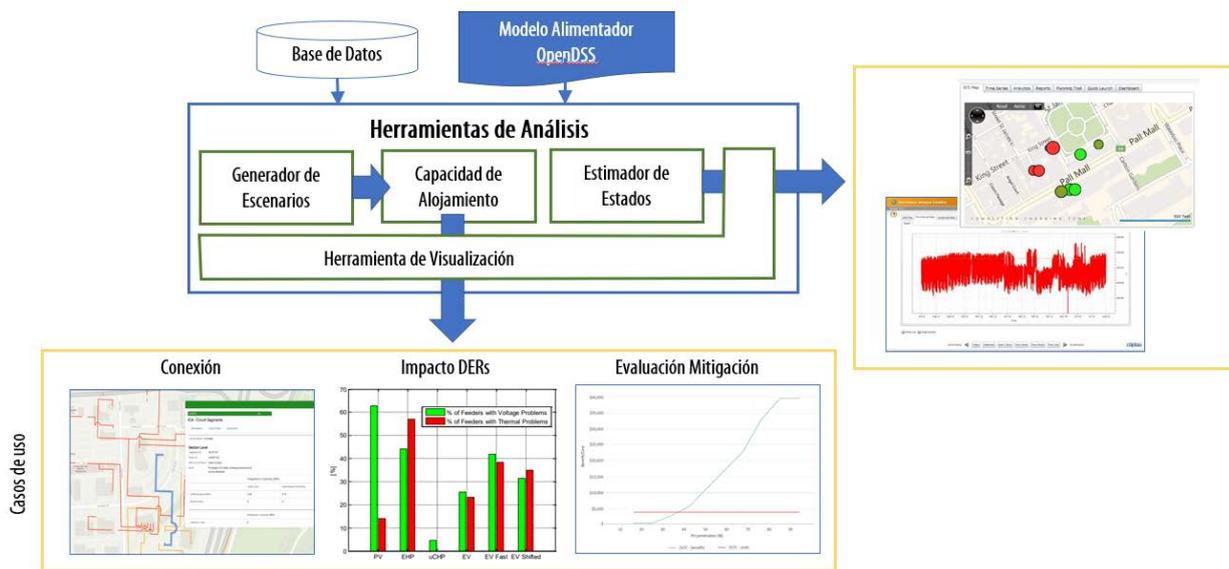


Figura 4: Plataforma computacional para el análisis de redes de distribución.

La Figura 4 muestra un diagrama de la estructura de la plataforma computacional a desarrollar. Se considera una estructura modular que permite desarrollar las diferentes herramientas de análisis de manera independiente pero que puedan compartir resultados entre ellas.

1. La herramienta **Estimador de Estados** proveerá información histórica o tiempo real de la operación de la red de distribución en base a mediciones y al modelo de la red. Además, esta herramienta permitirá estimar las variables operacionales que no puedan ser medidas directamente. Con esta herramienta también es posible hacer un análisis de observabilidad del sistema, permitiendo identificar zonas en donde los resultados de las estimaciones están sujetos a un mayor error. El análisis de observabilidad también permite guiar la instalación de nuevos equipos de medición para mejorar la capacidad de estimación.
2. La herramienta **Capacidad de Alojamiento** permitirá determinar la capacidad de alojamiento de los alimentadores para recibir nuevos proyectos de recursos energéticos distribuidos en base al modelo de la red y escenarios de demanda y penetración de recursos energéticos distribuidos. También permitirá evaluar el impacto de diferentes niveles de penetración de DERs sobre las redes de distribución. Finalmente, la herramienta permitirá evaluar el desempeño de diferentes

alternativas para mejorar la capacidad de alojamiento mediante el modelamiento de nuevos dispositivos tecnológicos o estrategias de control avanzada.

3. La herramienta **Generador de Escenarios** proveerá de escenarios de demanda y tecnológicos para el análisis de capacidad de almacenamiento, como la penetración de recursos energéticos distribuidos y las características de las distintas alternativas tecnológicas para aumentar la capacidad de alojamiento.
4. La herramienta de **Visualización** permitirá mostrar los resultados obtenidos por las herramientas descritas anteriormente de manera gráfica de modo facilitar el análisis. Esta herramienta permitirá ver información usando datos geográficos (GIS) de la operación y capacidades de la red de distribución.

Las herramientas de análisis toman como entrada el **Modelo de Red** y los **Datos Operacionales**. Se propone desarrollar el modelamiento de redes utilizando el software OpenDSS. Para ello se generará un modelo inicial utilizando información y parámetros técnicos de la infraestructura de la red bajo estudio. Luego, utilizando datos operacionales se ajustarán los parámetros del modelo inicial para representar de mejor manera la operación real del sistema. Este modelo ajustado se utilizará en las herramientas de análisis descritas anteriormente.

## 6 Referencias

- [1] Ministerio de Energía – Gobierno de Chile, “Transición Energética de Chile Política Energética Nacional Actualización 2022,” Chile, febrero 2022, disponible en:  
<https://www.energia.gob.cl/energia2050>.
- [2] IEA, “Net Zero by 2050,” IEA, Paris, 2021, disponible en:  
<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- [3] IEA, “Unlocking the Potential of Distributed Energy Resources,” IEA, Paris, 2022, disponible en:  
<https://www.iea.org/reports/unlocking-the-potential-of-distributed-energy-resources>.
- [4] UK Power Networks, PPA Energy, Capula “Distribution Network Visibility – Close Down Report,” diciembre 2013, disponible en:  
<https://innovation.ukpowernetworks.co.uk/projects/distribution-network-visibility/>.
- [5] IREC, “Key Decision for Hosting Capacity Analyses,” septiembre 2021, disponible en:  
<https://irecusa.org/resources/key-decisions-for-hosting-capacity-analyses/>.
- [6] CitiPower & Powercor, ENEA, “Future grid for distributed energy,” junio 2020, disponible en:  
<https://arena.gov.au/projects/distributed-energy-resources-hosting-capacity-study/>.
- [7] ENWL, “Low Voltage Network Solutions - Closedown Report,” 2014, disponible en:  
[https://www.ofgem.gov.uk/sites/default/files/docs/2017/04/lvns\\_closedown\\_report.pdf](https://www.ofgem.gov.uk/sites/default/files/docs/2017/04/lvns_closedown_report.pdf).
- [8] UK Power Networks, “Flexible Plug and Play – Close Down Report,” 2015, disponible en:  
<https://innovation.ukpowernetworks.co.uk/projects/flexible-plug-and-play/>.