



Consultoría técnica

Comportamiento de la frecuencia en la micro-red eléctrica de la UPB

UPB Smart Energy Center (SEC)

Por:

PhD. Santiago Bustamante Mesa

Dirigido por:

PhD. Jorge Wilson González Sanchez

Grupo de investigación:

Transmisión y distribución de energía (TyD)

Universidad Pontificia Bolivariana

Medellín

2024



**UPB Smart Energy Center (SEC)**

Conocimiento al servicio de la transición energética, inteligente y sostenible

## Contenido

1.	Resumen ejecutivo .....	6
2.	Objetivos .....	7
2,1.	Objetivo general.....	7
2,2.	Objetivos específicos .....	7
3.	Antecedentes .....	7
4.	Descripción del proyecto.....	8
5.	Metodología .....	10
5,1.	Recolección y análisis de información .....	10
5,2.	Modelado del sistema eléctrico.....	10
5,3.	Análisis eléctrico .....	10
5,4.	Propuesta de mejoras y estrategias.....	10
5,5.	Validación de resultados .....	11
5,6.	Documentación y divulgación.....	11
5,7.	RECOLECCIÓN, ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	11
5,8.	MODELAMIENTO DEL SISTEMA .....	11
5,9.	ANÁLISIS ELÉCTRICOS.....	13
5,9,1.	ANÁLISIS DE ESTADO ESTACIONARIO .....	13
5,9,2.	ANÁLISIS DE CORTO CIRCUITO .....	13
5,9,3.	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE FRECUENCIA .....	14
5,10.	CRITERIOS PARA LOS ANÁLISIS ELÉCTRICOS .....	14
5,10,1.	CALIDAD .....	14
5,10,2.	SEGURIDAD .....	14
6.	RESULTADOS .....	15
6,1.	ANÁLISIS DE ESTADO ESTACIONARIO.....	15
6,2.	ANÁLISIS DE CORTO CIRCUITO.....	17
6,3.	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE FRECUENCIA .....	22
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	26
8.	REFERENCIAS.....	28
	ANEXO 1: DIAGRAMAS UNIFILARES .....	29
	ANEXO 2: ANÁLISIS FLUJO DE CARGA.....	29
	ANEXO 3: ANÁLISIS CORTO CIRCUITO .....	29



# UPB Smart Energy Center (SEC)

Conocimiento al servicio de la transición energética, inteligente y sostenible

## Lista de figuras

Figura 1 Ubicación geográfica Universidad Pontificia Bolivariana “Adaptación Google maps” ....	9
Figura 2 Universidad Pontificia Bolivariana “Adaptación Google maps” .....	9
Figura 3 Unifilar de la micro-red UPB.....	12
Figura 4 Perdidas de potencia en las líneas de distribución en el estudio de flujo de carga .....	15
Figura 5 Cargabilidad de las líneas de distribución en el estudio de flujo de carga .....	16
Figura 6 Unifilar de cortocircuito para los casos de máxima y media demanda.....	17
Figura 7 Unifilar de cortocircuito para el caso de mínima demanda .....	18
Figura 8 Corriente inicial de corto circuito $I_k''$ [kA] .....	19
Figura 9 Potencia inicial de cortocircuito $S_k''$ [kVA].....	20
Figura 10 Corriente pico de cortocircuito $I_p$ [kA] .....	21

Lista de tablas

Tabla 1 Escenarios de estudio .....	12
Tabla 2 Despacho de generadores térmicos .....	13

## 1. Resumen ejecutivo

El proyecto "Comportamiento de la frecuencia en la micro-red eléctrica de la UPB" tiene como objetivo principal analizar, modelar y mejorar el desempeño de la frecuencia dentro de la micro-red eléctrica instalada en la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB). Este estudio contribuye al fortalecimiento de la gestión de sistemas energéticos inteligentes y sustentables, un campo prioritario en el marco de la transición energética global.

La micro-red de la UPB integra fuentes de energía renovable, sistemas de almacenamiento y cargas críticas en un entorno controlado. Debido a las fluctuaciones inherentes de las energías renovables, como la solar y la eólica, mantener la estabilidad de la frecuencia representa un desafío técnico que impacta la confiabilidad y eficiencia del sistema.

Los criterios de calidad y seguridad que se siguen en cada uno de los análisis que se realizan en el presente estudio son los definidos en el Código de Redes Resolución CREG 025 de 1995.

Dentro del presente estudio se realizaron los siguientes análisis eléctricos:

- Recolección, análisis y revisión de la información
- Modelamiento del sistema
- Análisis eléctricos en estado estable para condiciones normales de operación
- Análisis de pérdidas
- Análisis de cortocircuito
- Análisis de estabilidad de la frecuencia

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis de la frecuencia eléctrica en los diferentes escenarios de operación de la micro-red de la UPB, se concluye que el sistema responde de manera efectiva ante la pérdida del generador solar fotovoltaico. En los escenarios de demanda máxima y media, la frecuencia se mantiene dentro de rangos aceptables con mínimas desviaciones respecto a los valores nominales, lo que indica un comportamiento estable y robusto. Sin embargo, en el escenario de demanda mínima, se registraron mayores oscilaciones en la frecuencia, alcanzando un nadir más bajo, lo que refleja una mayor vulnerabilidad del sistema en estas condiciones.

Estos resultados destacan la importancia de implementar estrategias de control y mitigación de perturbaciones en escenarios de baja demanda para garantizar la calidad del suministro eléctrico. Asimismo, se valida la capacidad de la micro-red para operar con altos niveles de integración de fuentes renovables, cumpliendo con los estándares técnicos establecidos.



**UPB Smart Energy Center (SEC)**

Conocimiento al servicio de la transición energética, inteligente y sostenible

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo general

Analizar el desempeño de la frecuencia en la micro-red eléctrica de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) mediante el modelado de sus componentes considerando la integración de fuentes de energía renovable, sistemas de almacenamiento y cargas.

### 2.2. Objetivos específicos

- Analizar la información técnica disponible de la micro-red eléctrica de la UPB, con el fin de identificar las condiciones actuales de operación, los desafíos técnicos asociados a la estabilidad de la frecuencia y las posibles causas de fluctuaciones.
- Desarrollar un modelo eléctrico detallado de la micro-red, que integre las fuentes de energía renovable, los sistemas de almacenamiento y las cargas críticas, para evaluar su desempeño bajo diferentes escenarios operativos.
- Realizar análisis eléctricos en estado estacionario, de estabilidad de frecuencia, pérdidas y cortocircuito, considerando condiciones normales y críticas de operación, con el fin de entender el comportamiento del sistema desde la perspectiva de la frecuencia.

## 3. Antecedentes

La creciente integración de fuentes de energía renovable, como la solar y la eólica, plantea desafíos técnicos significativos para garantizar la estabilidad y confiabilidad de los sistemas eléctricos modernos. En este contexto, las micro-redes eléctricas surgen como soluciones innovadoras al permitir la integración de generación distribuida, sistemas de almacenamiento y cargas críticas en un entorno controlado. Sin embargo, las fluctuaciones inherentes a las energías renovables afectan directamente parámetros esenciales del sistema, como la estabilidad de la frecuencia, poniendo en riesgo su eficiencia y calidad.

La Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) cuenta con una micro-red eléctrica que combina fuentes de energía renovable, sistemas de almacenamiento y cargas críticas, lo que representa un escenario ideal para investigar soluciones avanzadas en el campo de la gestión energética inteligente y sustentable. No obstante, las fluctuaciones en la frecuencia, derivadas de la naturaleza intermitente de estas fuentes, han evidenciado la necesidad de un análisis más profundo que permita proponer estrategias para mejorar su desempeño.

En Colombia, el Código de Redes, establecido por la Resolución CREG 025 de 1995, define los criterios técnicos y operativos necesarios para garantizar la calidad y seguridad de los sistemas eléctricos. Este marco normativo proporciona las directrices fundamentales que rigen los análisis realizados en la micro-red de la UPB.

El presente proyecto, "Comportamiento de la frecuencia en la micro-red eléctrica de la UPB", busca abordar estas problemáticas mediante un enfoque integral que incluye la recolección y



**UPB Smart Energy Center (SEC)**

Conocimiento al servicio de la transición energética, inteligente y sostenible

análisis de datos, el modelado del sistema y la realización de estudios eléctricos. Estos estudios abarcan condiciones normales de operación, análisis de pérdidas, cortocircuitos y estabilidad de la frecuencia. Este esfuerzo no solo fortalecerá la gestión técnica de la micro-red, sino que también contribuirá al avance de soluciones sostenibles alineadas con la transición energética global.

#### **4. Descripción del proyecto**

El proyecto "Comportamiento de la frecuencia en la micro-red eléctrica de la UPB" tiene como propósito principal analizar, modelar y mejorar el desempeño de la frecuencia en la micro-red eléctrica instalada en la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB). Este sistema integra fuentes de energía renovable, sistemas de almacenamiento y cargas críticas, lo que lo convierte en un entorno controlado ideal para estudiar los desafíos técnicos asociados con la estabilidad y confiabilidad en sistemas eléctricos modernos.

A partir de la recolección y análisis de información técnica, el proyecto desarrolla un modelo eléctrico detallado de la micro-red para simular su comportamiento bajo diferentes condiciones operativas. Posteriormente, se realizan análisis específicos de estabilidad de frecuencia, pérdidas, cortocircuitos y condiciones de operación en estado estable. Estos estudios permiten identificar los factores que afectan la frecuencia del sistema y evaluar su impacto en la eficiencia y calidad del suministro eléctrico.

El trabajo se desarrolla bajo los lineamientos establecidos en el Código de Redes, Resolución CREG 025 de 1995, garantizando que las propuestas y mejoras estén alineadas con los estándares nacionales de calidad y seguridad.

El resultado esperado del proyecto es el diseño de estrategias técnicas que optimicen la estabilidad de la frecuencia y la eficiencia del sistema, contribuyendo así a la gestión de sistemas energéticos inteligentes y sostenibles, y apoyando los objetivos de la transición energética global. Este estudio no solo fortalece las capacidades técnicas de la micro-red, sino que también posiciona a la UPB como un referente en investigación aplicada en el campo de la energía renovable y la sostenibilidad. En la Figura 1 se presenta la ubicación geográfica de la Universidad Pontificia Bolivariana y su correspondiente micro-red. Por otra parte, en la Figura 2 se presenta una vista aérea de la disposición del campus principal de la Universidad Pontificia Bolivariana.



**UPB Smart Energy Center (SEC)**

Conocimiento al servicio de la transición energética, inteligente y sostenible





## 5. Metodología

La metodología del proyecto "Comportamiento de la frecuencia en la micro-red eléctrica de la UPB" se estructura en las siguientes etapas clave, orientadas a garantizar un análisis integral y proponer soluciones efectivas para mejorar el desempeño de la frecuencia en la micro-red:

### 5.1. Recolección y análisis de información

- **Qué:** Identificar y compilar datos técnicos de la micro-red eléctrica, incluyendo especificaciones de los componentes, datos operativos históricos, y documentación técnica relevante.
- **Cómo:** Revisar registros existentes, realizar mediciones en campo, y recopilar información de las fuentes de energía renovable, sistemas de almacenamiento y cargas críticas.
- **Para qué:** Establecer una base de datos confiable que permita evaluar el estado actual de la micro-red y los factores que influyen en la estabilidad de la frecuencia.

### 5.2. Modelado del sistema eléctrico

- **Qué:** Construir un modelo matemático y computacional de la micro-red.
- **Cómo:** Utilizar software especializado en simulación eléctrica (como DlgSILENT, MATLAB/Simulink u otros equivalentes), integrando datos de generación renovable, almacenamiento y demanda.
- **Para qué:** Simular el comportamiento del sistema bajo diferentes escenarios operativos y analizar el impacto de las fluctuaciones en la frecuencia.

### 5.3. Análisis eléctrico

- **Qué:** Evaluar el desempeño de la micro-red a través de estudios específicos, como:
  - Análisis de estabilidad de la frecuencia.
  - Análisis de pérdidas en condiciones normales de operación.
  - Análisis de cortocircuito para identificar vulnerabilidades en el sistema.
- **Cómo:** Realizar simulaciones y cálculos eléctricos utilizando el modelo desarrollado, considerando las condiciones de operación actuales y escenarios hipotéticos críticos.
- **Para qué:** Diagnosticar el comportamiento del sistema y determinar las áreas que requieren intervención para mejorar la estabilidad, confiabilidad y eficiencia.

### 5.4. Propuesta de mejoras y estrategias

- **Qué:** Diseñar estrategias técnicas para optimizar la estabilidad de la frecuencia y el desempeño general del sistema.
- **Cómo:** Basarse en los resultados de los análisis eléctricos y en las normas definidas por la Resolución CREG 025 de 1995.



**UPB Smart Energy Center (SEC)**

Conocimiento al servicio de la transición energética, inteligente y sostenible

- **Para qué:** Implementar soluciones que garanticen la operación eficiente y segura de la micro-red, alineadas con los objetivos de sostenibilidad y transición energética.

#### 5,5. Validación de resultados

- **Qué:** Verificar la efectividad de las estrategias propuestas.
- **Cómo:** Implementar las mejoras de manera experimental o a través de simulaciones avanzadas, y comparar los resultados con los datos de referencia iniciales.
- **Para qué:** Asegurar que las propuestas cumplen con los objetivos del proyecto y los estándares técnicos establecidos.

#### 5,6. Documentación y divulgación

- **Qué:** Registrar los resultados, análisis y conclusiones del proyecto en un informe técnico detallado.
- **Cómo:** Redactar y presentar el informe a las partes interesadas, y divulgar los hallazgos a través de conferencias, publicaciones académicas o proyectos de extensión.
- **Para qué:** Contribuir al avance del conocimiento en el campo de la energía renovable y fortalecer la posición de la UPB como referente en investigación aplicada.

#### 5,7. RECOLECCIÓN, ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LA INFORMACIÓN

El modelo base de la red fue suministrado por el equipo del Smart Energy Center (SEC) de la Universidad pontificia Bolivariana, quienes han venido desarrollando el modelo a partir de los datos reales de medición obtenidos en sitio y los parámetros técnicos de los diferentes dispositivos.

#### 5,8. MODELAMIENTO DEL SISTEMA

El modelado de la red se hizo empleando la herramienta para el análisis de sistemas eléctricos de potencia DlgSILENT PowerFactory. En la Figura 3 se muestra del unifilar que corresponde a la micro-red eléctrica de la Universidad pontificia Bolivariana.

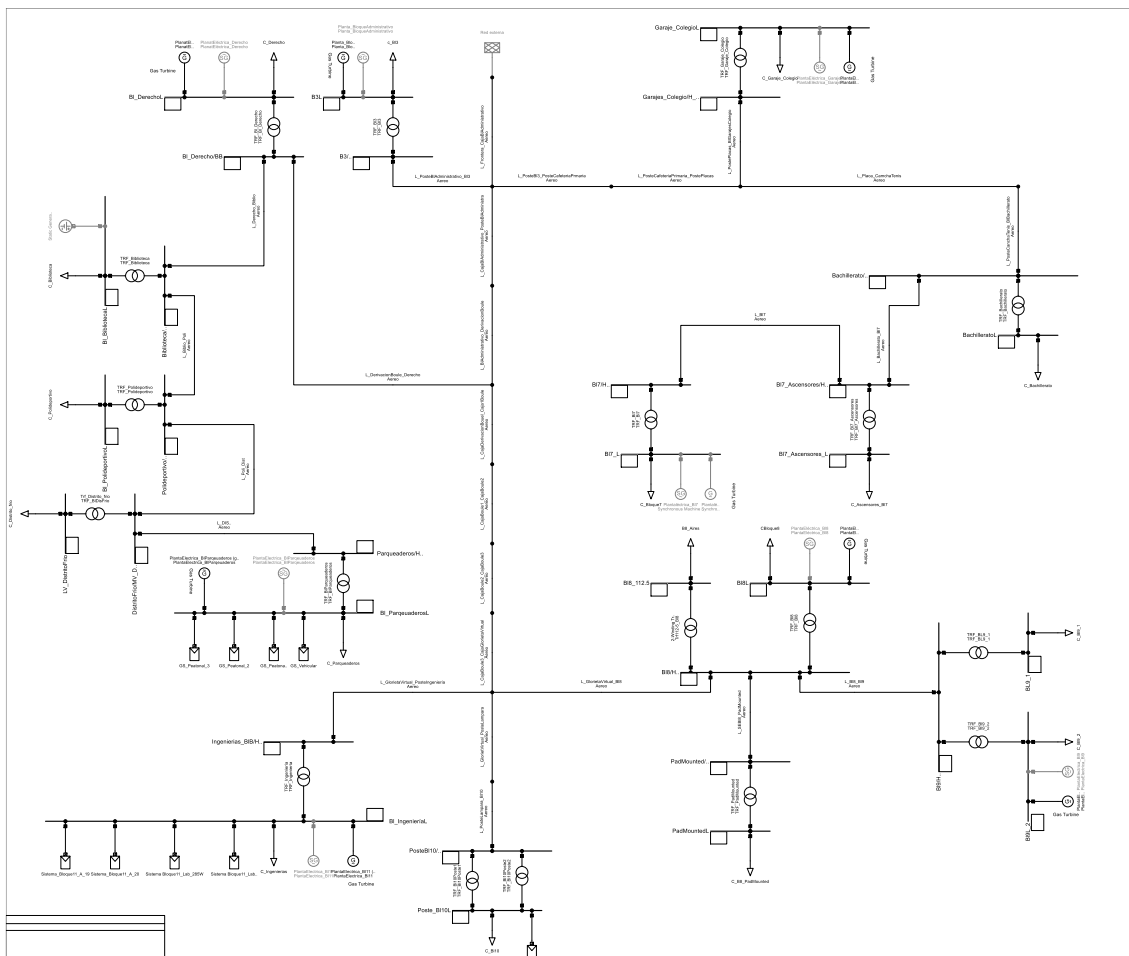


Figura 3 Unifilar de la micro-red UPB

Los escenarios de estudio que se plantean corresponden a los presentados en la Tabla 1:

Tabla 1 Escenarios de estudio

Demanda	Aporte (generación solar)
Máxima	Máximo
Media	Máximo
Mínima	Máximo

Se plantean tres escenarios de demanda que son evaluados considerando el máximo aporte de generación por parte de las plantas solares fotovoltaicas. Esto, con el fin de determinar como se ve afectada la frecuencia al tener pérdidas de generación por parte de los diferentes subsistemas solares fotovoltaicos.

Tabla 2 Despacho de generadores térmicos

Planta	Escenario		
	Dmax	Dmed	Dmin
PlantatEléctrica_ Derecho	x	x	x
PlantaElectrica_ BI11	x	x	x
PlantaElectrica_ BI9	x	x	No
PlantaElectrica_ BIParquaderos	x	x	x
PlantaEléctrica_ BI8	x	x	x
PlantaEléctrica_ Garajes	x	x	No
Planta_ BloqueAdministrativo	x	x	No
Plantaléctrica_ BI7	No	No	No

## 5.9. ANÁLISIS ELÉCTRICOS

Los análisis eléctricos se realizan a partir de los resultados obtenidos del software DiGSILENT PowerFactory, los cuales son:

- Flujo de carga AC en estado estable para condiciones normales de operación.
- Análisis de pérdidas en la micro-red
- Análisis de cortocircuito monofásico y trifásico con base en la norma IEC60909.
- Análisis de estabilidad de frecuencia

### 5.9.1. ANÁLISIS DE ESTADO ESTACIONARIO

Se realizaron flujos de carga bajo condiciones normales de operación en cada uno de los escenarios planteados, con el fin de conocer el estado del sistema referente a las tensiones en las barras y los niveles de cargabilidad de los equipos junto con el cálculo de las pérdidas de potencia de las líneas que componen la micro-red, con el fin de observar que cumplan con los criterios de calidad y seguridad definidos para estado estacionario.

Para el análisis de pérdidas se realizará simulaciones de flujo de carga en cada escenario planteado, con el fin de determinar las pérdidas de potencia que se presentan con la implementación de dicho sistema.

### 5.9.2. ANÁLISIS DE CORTO CIRCUITO

Para el análisis de corto circuito se evalúan los niveles máximos de cortocircuito trifásico y monofásico para cada uno de los escenarios planteados, empleado la norma IEC6009 "Cálculo de corrientes de cortocircuito en sistemas trifásicos en A.C".

En los resultados de cortocircuito se muestran las siguientes variables de acuerdo con las definiciones de la norma IEC 60909:

- Skss: Initial Short-Circuit Power



**UPB Smart Energy Center (SEC)**

Conocimiento al servicio de la transición energética, inteligente y sostenible

- $I_{kss}$ : initial symmetrical short-circuit current (RMS)
- $I_p$ : peak short-circuit current (instantaneous value)

### 5,9,3. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE FRECUENCIA

Para cada uno de los escenarios planteados, se realizará la desconexión de cada unidad de generación solar fotovoltaica de la micro-red simulando una falla N-1 con el fin de establecer cual es el comportamiento de la frecuencia ante tales eventos en cada uno de los escenarios.

## 5,10. CRITERIOS PARA LOS ANÁLISIS ELÉCTRICOS

Los criterios para realizar los análisis eléctricos son los definidos en la resolución CREG 025 de 1995 “código de redes”, los cuales son calidad y seguridad.

### 5,10,1. CALIDAD

- En estado estacionario las tensiones en las barras no deben ser inferiores a 0.9 p.u. ni superiores al 1.1 p.u. del valor nominal.
- La máxima transferencia por las líneas se considera como el mínimo valor entre el límite térmico de los conductores, la máxima capacidad de los transformadores de corriente y el límite de transmisión por regulación de voltaje.
- La cargabilidad de los transformadores se mide por su capacidad de corriente nominal, para tener en cuenta las variaciones de voltaje de operación con respecto al nominal del equipo.
- No se permiten sobrecargas permanentes. En el corto y muy corto plazo se pueden fijar límites de sobrecarga de acuerdo con la duración de la misma sin sobrepasar las temperaturas máximas permisibles de los equipos y sin disminuir la vida útil de los mismos.

### 5,10,2. SEGURIDAD

- El sistema debe permanecer estable bajo una falla trifásica a tierra en uno de los circuitos del sistema, con despeje de la falla por operación normal de la protección principal.
- El sistema debe permanecer estable bajo una falla monofásica a tierra en uno de los circuitos del sistema, con despeje de la falla por operación normal de la protección principal.
- Se permiten sobrecargas bajo contingencia en las líneas y en los transformadores (si aplica) siempre que éstas se encuentren por debajo del tiempo y de la máxima capacidad de transporte de emergencia declarada. La cargabilidad de los transformadores se mide por su capacidad de corriente nominal y para las líneas se toma el mínimo valor entre el límite térmico de los conductores, límite por regulación de tensión y el límite por estabilidad, aplicando los criterios expuestos anteriormente.

## 6. RESULTADOS

### 6.1. ANÁLISIS DE ESTADO ESTACIONARIO

Se realizó el análisis de estado estacionario para cada escenario planteado en el numeral 5.8. A continuación, se presentan los resultados de tensión en barras y cargabilidad de líneas y transformadores de la micro-red de la Universidad Pontificia Bolivariana.

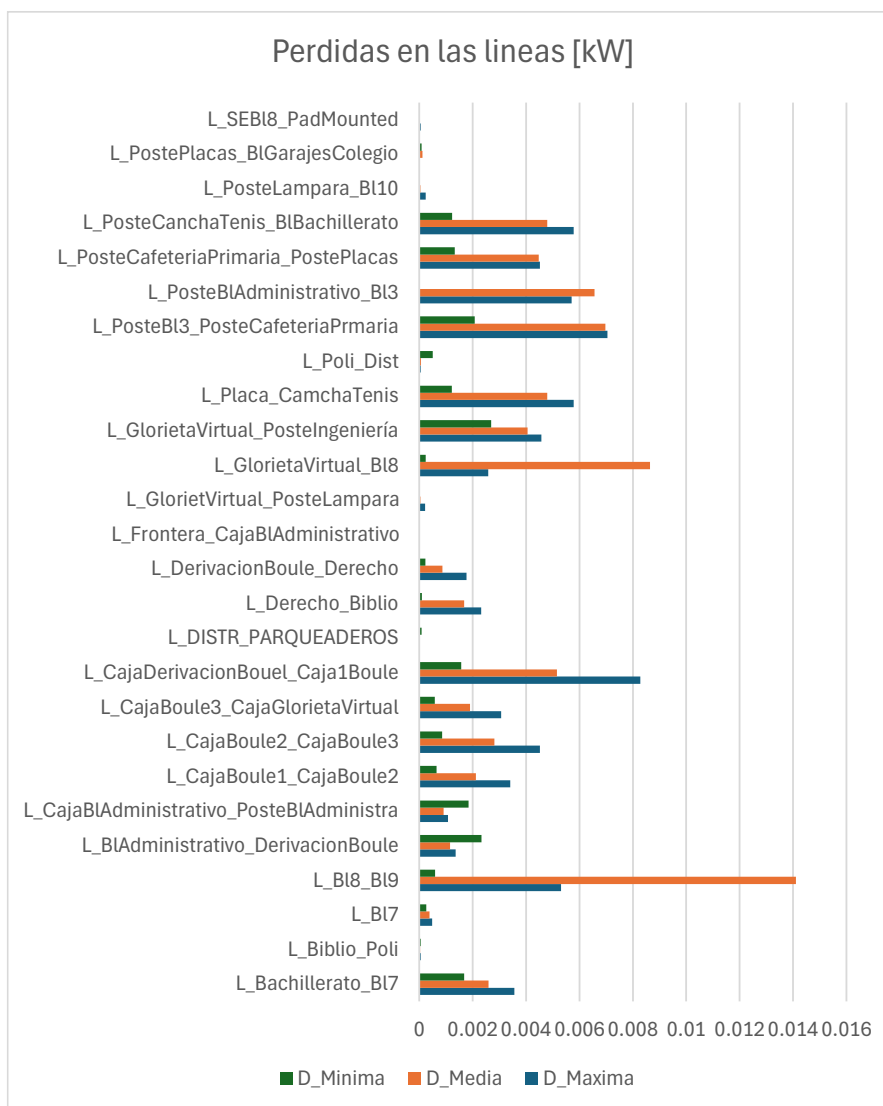


Figura 4 Pérdidas de potencia en las líneas de distribución en el estudio de flujo de carga

A partir de los resultados presentados en la Figura 4 de pérdidas de potencia eléctrica en las líneas, se observa que las pérdidas disminuyen de manera general conforme se reduce la demanda del sistema (de máxima a mínima). Este comportamiento es natural, ya que una menor demanda implica corrientes más bajas en las líneas, lo que reduce las pérdidas por efecto Joule. Sin embargo, algunas líneas presentan variaciones particulares. Por ejemplo, la línea **L\_BI8\_BI9** tiene pérdidas significativamente altas en la demanda media (**14.10913 kW**) en comparación con la demanda máxima (**0.00531351 kW**), lo que podría indicar un cambio en el flujo de carga o una condición operativa especial en este escenario.

**UPB Smart Energy Center (SEC)**

Conocimiento al servicio de la transición energética, inteligente y sostenible

Además, hay líneas como **L\_Frontera\_CajaBIAdministrativo** que no presentan pérdidas en ningún escenario, lo cual sugiere que no hay flujo de corriente en estas condiciones. Por otro lado, líneas como **L\_PosteBI3\_PosteCafeteriaPrmaria** y **L\_CajaDerivacionBouel\_Caja1Boule** tienen pérdidas elevadas incluso en demanda mínima (**2.07408 kW** y **1.5695 kW**, respectivamente), indicando que son tramos críticos para la eficiencia del sistema y requieren una evaluación detallada.

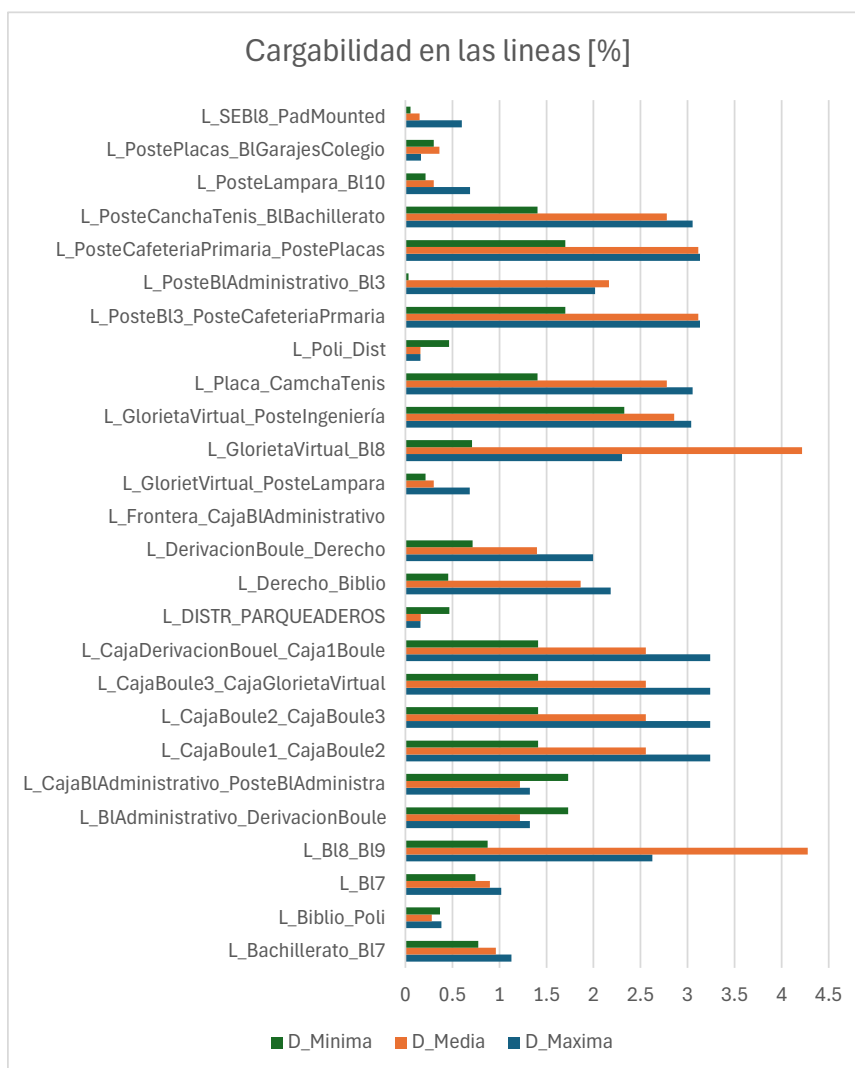


Figura 5 Cargabilidad de las líneas de distribución en el estudio de flujo de carga

De los resultados de cargabilidad de las líneas presentados en la Figura 5, se observa que varias de ellas presentan niveles de utilización superiores al 100% en ciertas condiciones de demanda, lo que podría indicar un sobreesfuerzo de dichas líneas y la necesidad de una revisión en la capacidad de diseño o en la redistribución de las cargas. Por ejemplo, las líneas **L\_CajaDerivacionBouel\_Caja1Boule**, **L\_CajaBoule1\_CajaBoule2**, y **L\_PosteCafeteriaPrimaria\_PostePlacas** muestran valores de cargabilidad altos en los tres escenarios de demanda, alcanzando niveles superiores al 300% en demanda máxima. Estas condiciones pueden representar riesgos para la seguridad y confiabilidad del sistema.



En contraste, algunas líneas como **L\_Frontera\_CajaBIAdministrativo** tienen valores insignificantes de cargabilidad en todos los escenarios, sugiriendo que podrían estar subutilizadas o incluso fuera de operación. Asimismo, líneas como **L\_DISTR\_PARQUEADEROS** y **L\_Poli\_Dist** presentan una baja cargabilidad en general, lo que puede indicar una sobredimensión o una carga ligera en estos tramos.

Cabe destacar que los valores de cargabilidad cambian significativamente entre escenarios de demanda, siendo notable el incremento en líneas como **L\_BI8\_BI9** y **L\_GlorietaVirtual\_BI8** en el escenario de demanda media, lo que sugiere cambios en los flujos de carga durante esta condición operativa. Este análisis resalta la importancia de evaluar la cargabilidad no solo en condiciones de demanda máxima, sino también en los demás escenarios, para garantizar un diseño óptimo y una operación segura y eficiente del sistema eléctrico.

## 6.2. ANÁLISIS DE CORTO CIRCUITO

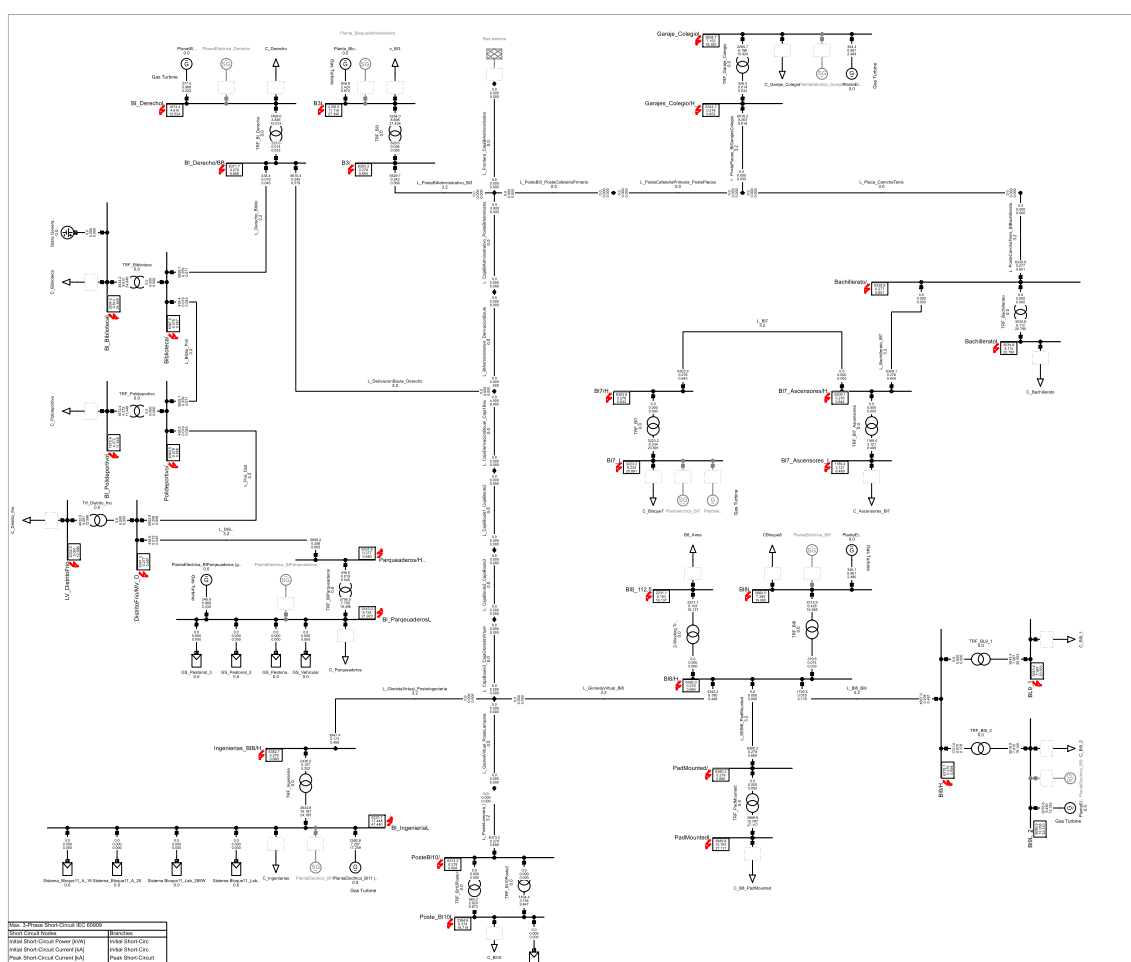


Figura 6 Unifilar de cortocircuito para los casos de máxima y media demanda

La *Figura 6* presenta el diagrama unifilar con los resultados del estudio de cortocircuito trifásico para los casos de máxima y media demanda. Ambos escenarios comparten el mismo unifilar, ya que el despacho de generación se mantiene constante, sin variaciones en la disposición o capacidad de las fuentes. Esto se debe a que, según el método IEC 60909, la demanda no influye en los cálculos de corrientes de cortocircuito trifásico. Este método considera principalmente las

# UPB Smart Energy Center (SEC)

Conocimiento al servicio de la transición energética, inteligente y sostenible

características de los generadores, transformadores y la impedancia del sistema, lo que permite que los resultados entre máxima y media demanda se representen de manera equivalente en el análisis.

Por otro lado, la *Figura 7* muestra el diagrama unifilar con los resultados del estudio de cortocircuito trifásico para el caso de demanda mínima, también calculados utilizando el método IEC 60909. En este escenario, los valores reflejan las condiciones más desfavorables de operación del sistema, con menores corrientes de cortocircuito debido a la reducción en las contribuciones de los generadores síncronos. Esto permite identificar las condiciones límite del sistema eléctrico y evaluar la capacidad de los dispositivos de protección para responder adecuadamente incluso en situaciones de baja demanda.

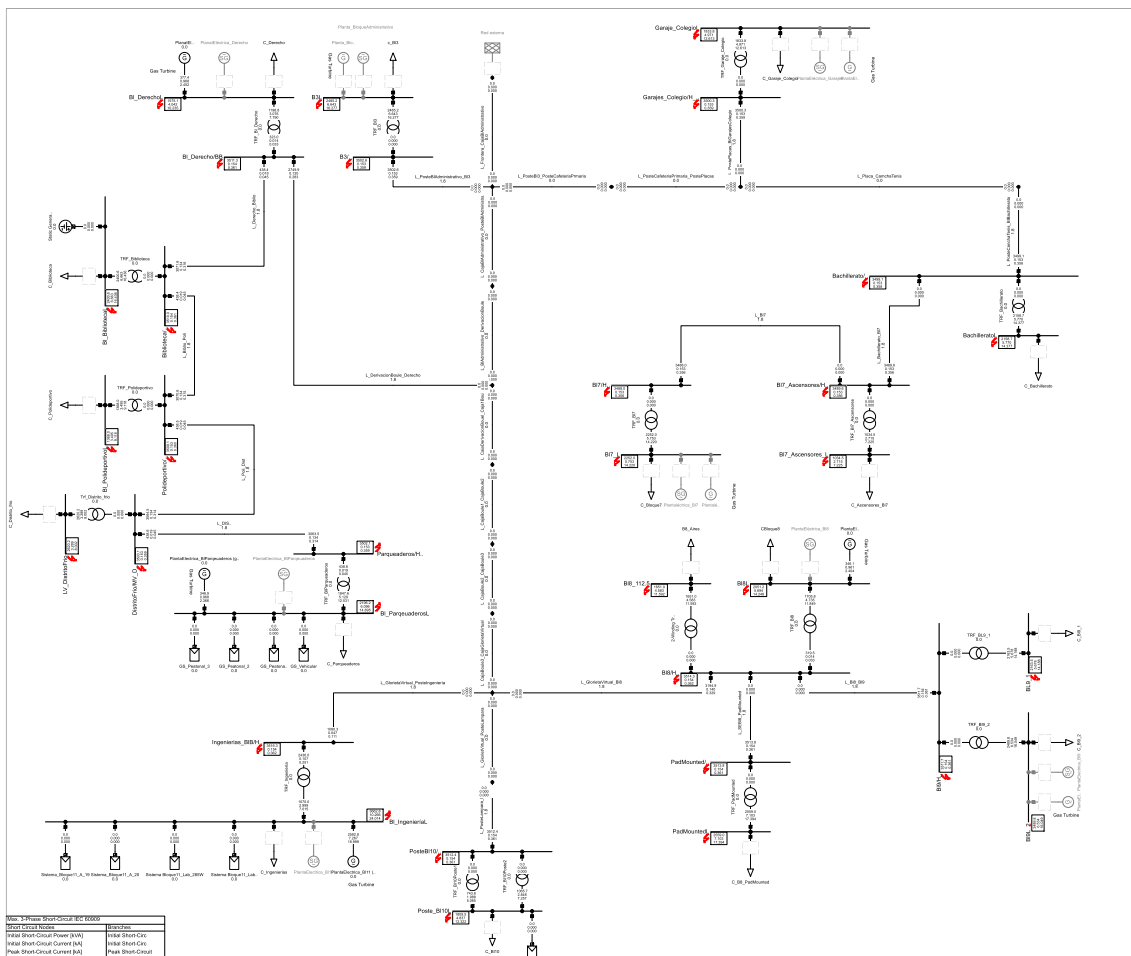


Figura 7 Unifilar de cortocircuito para el caso de mínima demanda

Como se presenta en la Figura 8 de resultados de cortocircuito inicial  $I_{k''}$ , se pueden observar diferencias significativas en los niveles de corriente de cortocircuito inicial (máxima, media y mínima) entre las distintas barras del sistema. Por ejemplo, las barras asociadas a edificios principales como **BI\_IngenieríaL** (máximo: 17.45 kA, mínimo: 10.27 kA) y **BI9L\_2** (máximo: 13.36 kA, mínimo: 6.53 kA) presentan niveles elevados, lo que sugiere que están conectadas a puntos cercanos a la fuente principal o a transformadores de alta capacidad. Por otro lado, barras como **BB**, **H\_B3**, y otras del nivel "H" tienen valores muy bajos (máximo alrededor de 0.28 kA), lo que

indica que se encuentran lejos de la fuente principal o protegidas por transformadores con elevada impedancia.

Además, barras como **PadMountedL** (máximo: 10.8 kA, mínimo: 7.10 kA) y **B3L** (máximo: 11.12 kA, mínimo: 6.64 kA) destacan por tener un rango intermedio, probablemente debido a su ubicación en el sistema eléctrico, que podría combinar proximidad moderada a la fuente.

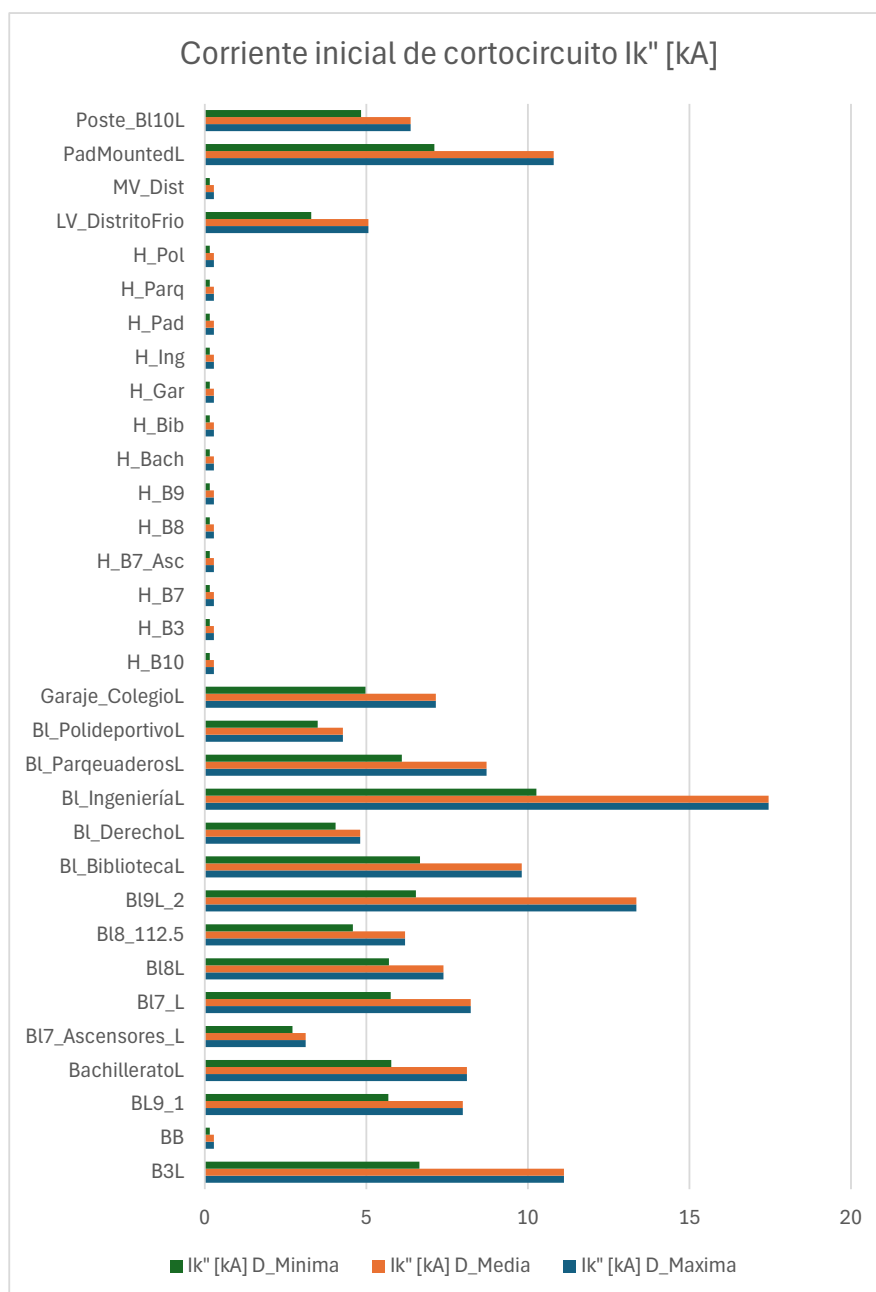


Figura 8 Corriente inicial de corto circuito  $I_k''$  [kA]

A partir de resultados de la potencia de cortocircuito inicial ( $S_k''$ ) presentados en la *Figura 9*, se observa que las barras de nivel **H** tienen consistentemente altos valores de potencia de cortocircuito, con máximos cercanos a 6382 kVA y mínimos alrededor de 3502 kVA. Esto indica

una conexión robusta al sistema eléctrico principal, con transformadores de alta capacidad y bajas impedancias.

Por otro lado, barras como **BI7\_Ascensores\_L** (máximo: 1189 kVA, mínimo: 1034 kVA) y **BI8\_112.5** (máximo: 2231 kVA, mínimo: 1651 kVA) presentan valores significativamente menores, lo que puede deberse a su lejanía relativa de las fuentes principales o a limitaciones en las capacidades de los transformadores.

Destacan barras como **BI\_IngenieríaL** (máximo: 6225 MVA, mínimo: 3663 kVA) y **BI9L\_2** (máximo: 5089 kVA, mínimo: 2490 kVA), que muestran una alta potencia de cortocircuito inicial, representando puntos críticos en el diseño del sistema, dado que cualquier fallo en estas ubicaciones puede impactar significativamente el sistema.

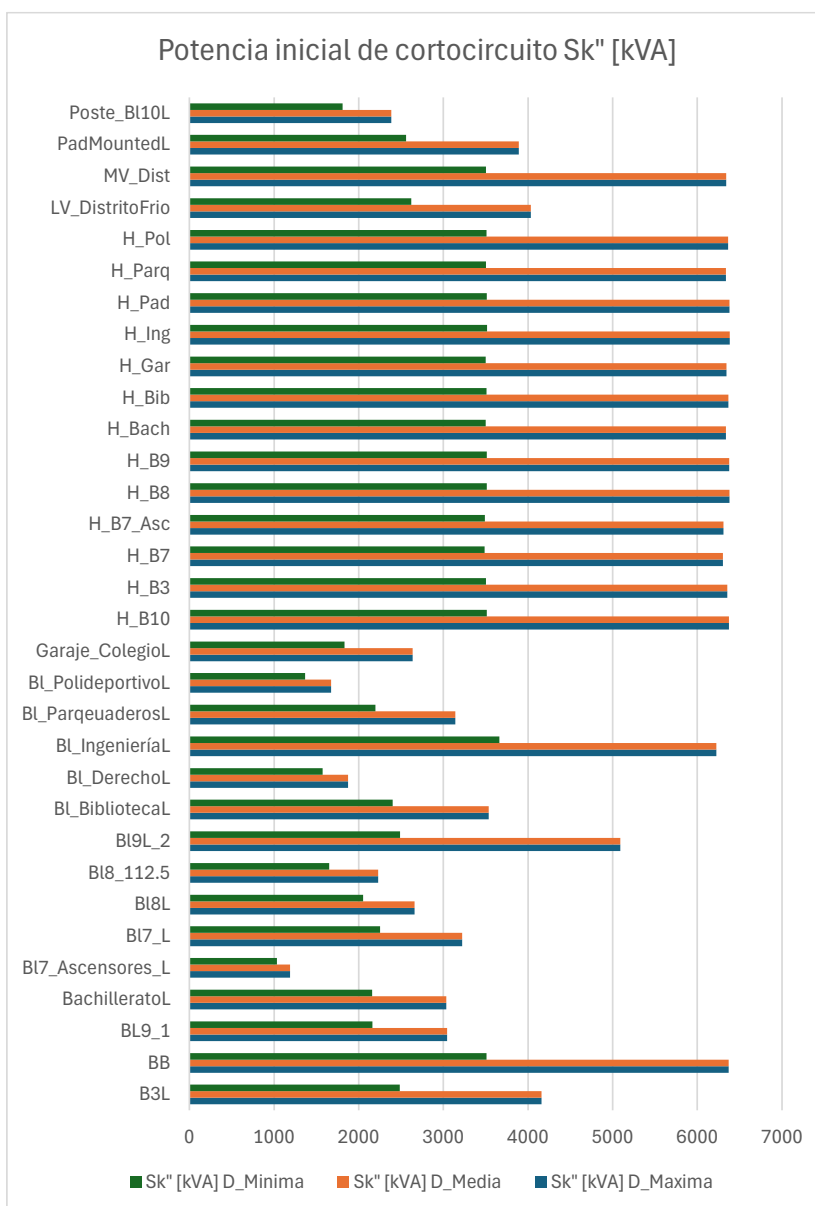


Figura 9 Potencia inicial de cortocircuito Sk" [kVA]

A partir de la *Figura 10* que presenta los valores de la corriente de pico ( $I_p$ ), se pueden identificar diferencias importantes en los niveles de intensidad de corriente en las distintas barras. Las barras principales como **BL\_IngenieríaL** (máxima: 41.44 kA, mínima: 24.01 kA) y **BI9L\_2** (máxima: 32.31 kA, mínima: 16.05 kA) destacan por sus elevados valores, lo que las posiciona como puntos críticos en el sistema eléctrico, probablemente debido a su proximidad a las fuentes de alimentación principales y a los transformadores de mayor capacidad.

Por el contrario, las barras del nivel **H** muestran valores de corriente de pico significativamente menores (máximos alrededor de 0.66 kA), lo que indica una reducción considerable en la intensidad de corriente, probablemente por la presencia de transformadores con alta impedancia o largas distancias desde las fuentes principales.

Barras como **PadMountedL** (máxima: 27.12 kA, mínima: 17.39 kA) y **B3L** (máxima: 27.39 kA, mínima: 16.28 kA) también presentan valores intermedios-altos, lo que las convierte en ubicaciones importantes para la selección de dispositivos de protección y estrategias de mitigación de fallas.

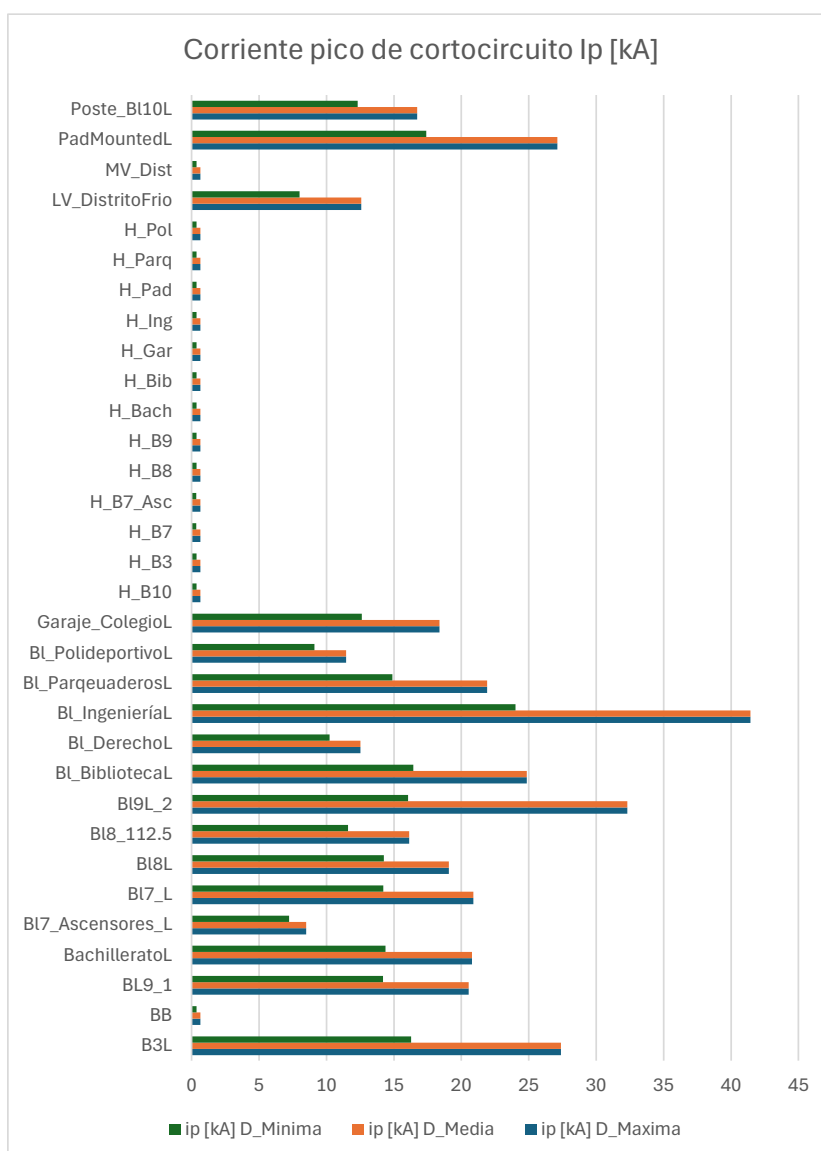
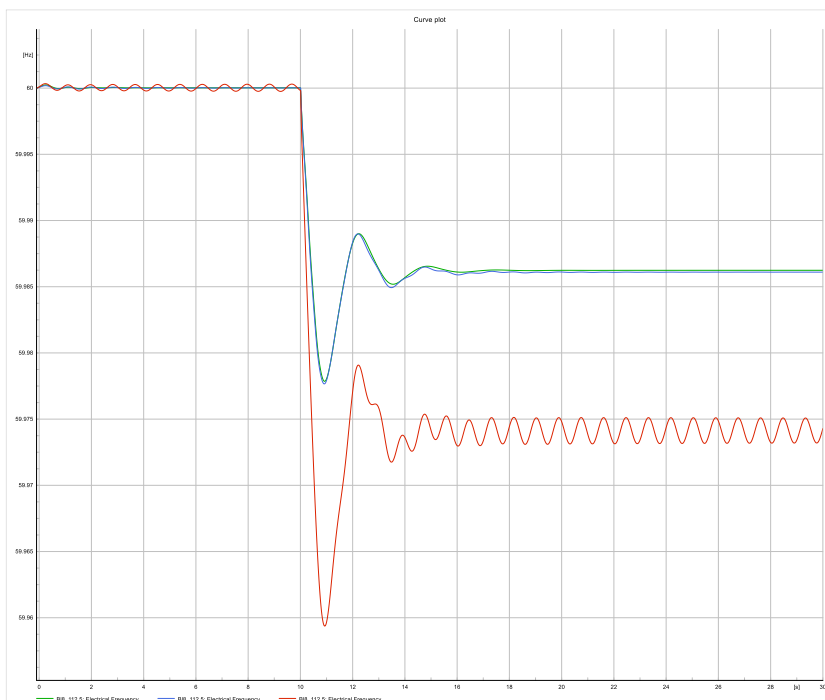


Figura 10 Corriente pico de cortocircuito  $I_p$  [kA]

### 6.3. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE FRECUENCIA



- Métricas de calidad de la frecuencia eléctrica para cada escenario:

#### 1. Demanda Máxima (G2\_Dmax):

- Nadir: **59.977851 Hz**
- Frecuencia promedio: **59.99079 Hz**
- Desviación estándar: **0.00675 Hz**

#### 2. Demanda Media (G2\_Dmed):

- Nadir: **59.977656 Hz**
- Frecuencia promedio: **59.99069 Hz**
- Desviación estándar: **0.00681 Hz**

#### 3. Demanda Mínima (G2\_Dmin):

- Nadir: **59.959364 Hz**
- Frecuencia promedio: **59.98268 Hz**
- Desviación estándar: **0.01266 Hz**

#### 1. Interpretación de los datos por escenario:

##### 2. Demanda Máxima:

- El nadir alcanzado es de 59.977851 Hz, lo que indica que la pérdida del generador fotovoltaico tiene un impacto limitado en este escenario, ya que la frecuencia permanece cercana al valor nominal de 60 Hz.

**UPB Smart Energy Center (SEC)**

Conocimiento al servicio de la transición energética, inteligente y sostenible

### 3. Demanda Media:

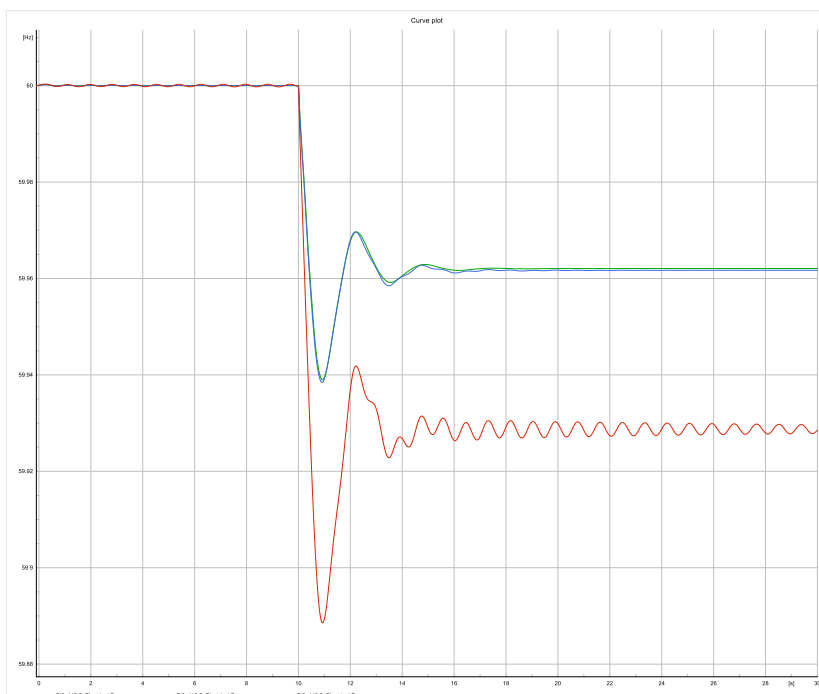
- El nadir en este escenario es de 59.977656 Hz, ligeramente inferior al caso de demanda máxima. Esto sugiere que en condiciones de demanda media, la micro-red muestra una capacidad de respuesta similar a la de la demanda máxima, con una desviación mínima.

### 4. Demanda Mínima:

- El nadir más bajo (59.959364 Hz) ocurre bajo condiciones de demanda mínima. Esto evidencia que en situaciones de baja carga, el sistema es más sensible a perturbaciones como la pérdida del generador solar, presentando una mayor desviación de la frecuencia nominal.

### 5. Comparaciones significativas:

- La mayor desviación de frecuencia ocurre en el escenario de **Demanda Mínima**, lo cual es consistente con la menor inercia del sistema cuando la carga es baja.
- En general, el sistema mantiene la frecuencia cerca de los valores nominales en todos los escenarios, lo que indica una buena estabilidad de la micro-red ante esta perturbación específica.
- Las diferencias en el nadir entre demanda máxima y media son mínimas, lo que sugiere que el comportamiento del sistema es casi equivalente en estas dos condiciones.



- Métricas de calidad de la frecuencia eléctrica para cada escenario:

#### 4. Demanda Máxima (G2\_Dmax):

- Nadir: **59.939 Hz**
- Frecuencia promedio: **59.975 Hz**
- Desviación estándar: **0.0186 Hz**

5. **Demanda Media (G2\_Dmed):**

- Nadir: **59.938 Hz**
- Frecuencia promedio: **59.974 Hz**
- Desviación estándar: **0.0188 Hz**

6. **Demanda Mínima (G2\_Dmin):**

- Nadir: **59.889 Hz**
- Frecuencia promedio: **59.952 Hz**
- Desviación estándar: **0.0348 Hz**

• **Análisis y observaciones:**

• **Demanda máxima y media:**

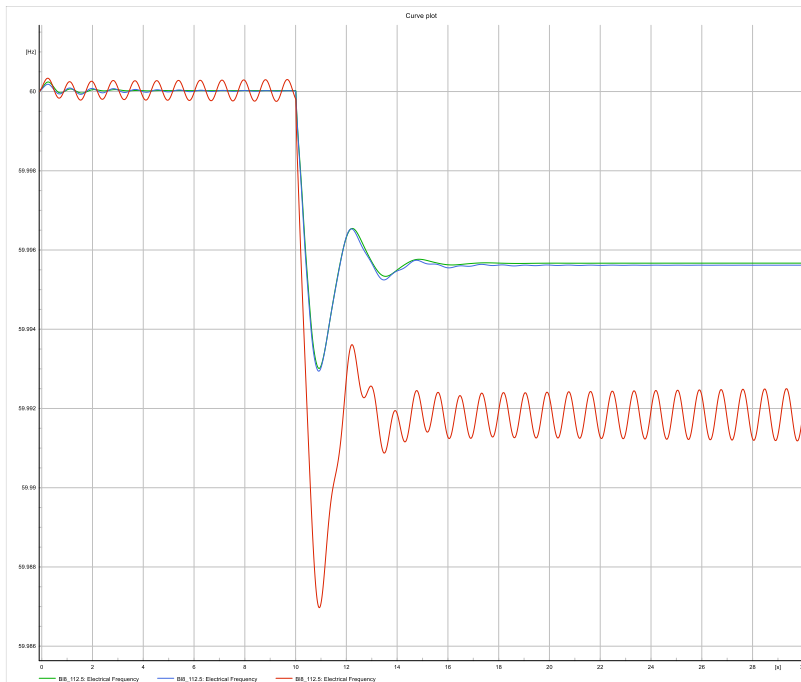
- En ambos escenarios, el nadir es muy cercano, con valores ligeramente superiores a **59.938 Hz**, lo que indica que la red presenta un comportamiento estable bajo condiciones de alta y media demanda.
- Las frecuencias promedio en estos escenarios son similares, alrededor de **59.975 Hz**, con pequeñas variaciones.

• **Demanda mínima:**

- El nadir alcanza el valor más bajo (**59.889 Hz**), indicando que la red es más vulnerable cuando la demanda es baja.
- La frecuencia promedio también es ligeramente menor (**59.952 Hz**) comparada con los otros escenarios.
- La desviación estándar es significativamente más alta (**0.0348 Hz**), lo que sugiere mayor inestabilidad de la frecuencia bajo condiciones de demanda mínima.

En general, se evidencia que la red tiene un mejor desempeño en términos de estabilidad (menor desviación estándar y mayores valores de nadir) cuando opera en escenarios de alta o media demanda. Sin embargo, en situaciones de demanda mínima, se percibe un aumento en las fluctuaciones y un nadir más bajo, lo que podría representar un riesgo mayor para la calidad del suministro eléctrico.





- **Métricas de calidad de la frecuencia eléctrica para los escenarios de G3**

1. **Demanda máxima (G3\_Dmax):**

- **Nadir:** 59.99301 Hz
- **Promedio de frecuencia:** 59.99711 Hz
- **Desviación estándar:** 0.00214 Hz

2. **Demanda media (G3\_Dmed):**

- **Nadir:** 59.99294 Hz
- **Promedio de frecuencia:** 59.99707 Hz
- **Desviación estándar:** 0.00216 Hz

3. **Demanda mínima (G3\_Dmin):**

- **Nadir:** 59.98697 Hz
- **Promedio de frecuencia:** 59.99455 Hz
- **Desviación estándar:** 0.00402 Hz

- **Observaciones y análisis:**

- **Escenario de demanda máxima (G3\_Dmax):** Este escenario muestra la mayor estabilidad de la frecuencia eléctrica, con el valor promedio más cercano a 60 Hz y la desviación estándar más baja (0.00214 Hz), indicando menor variabilidad. Sin embargo, el nadir es ligeramente más alto en comparación con otros escenarios.
- **Escenario de demanda media (G3\_Dmed):** El comportamiento es muy similar al de demanda máxima, con valores promedio y desviaciones estándar comparables. El nadir

en este escenario es el segundo más bajo, mostrando una respuesta estable a la pérdida del generador.

- **Escenario de demanda mínima (G3\_Dmin):** En este escenario, la frecuencia muestra mayor variabilidad (desviación estándar de 0.00402 Hz) y alcanza el nadir más bajo (59.98697 Hz). Esto indica que la micro-red es más sensible a perturbaciones bajo condiciones de baja demanda.

Los datos sugieren que la micro-red de la UPB mantiene una buena estabilidad de frecuencia en condiciones de demanda máxima y media, pero la respuesta es más sensible en el escenario de demanda mínima. Esto resalta la importancia de diseñar estrategias de control para mitigar fluctuaciones bajo cargas bajas, donde los efectos de la pérdida del generador son más pronunciados.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1. Conclusiones

#### 1. Estabilidad de la frecuencia en la micro-red de la UPB:

- En general, la micro-red mantiene una frecuencia estable cercana al valor nominal de 60 Hz en los escenarios de demanda máxima y media. Esto demuestra una adecuada capacidad de respuesta ante perturbaciones menores, como la pérdida de un generador solar fotovoltaico.
- En el escenario de demanda mínima, el nadir más bajo y la mayor desviación estándar reflejan una menor estabilidad, indicando que la red es más sensible a perturbaciones en condiciones de baja carga. Esto se debe a la reducción en la inercia del sistema y menor capacidad de absorción de fluctuaciones.

#### 2. Comparaciones entre escenarios:

- Los valores de nadir y desviación estándar en los escenarios de demanda máxima y media son similares, evidenciando un comportamiento consistente en estas condiciones operativas.
- En contraste, el escenario de demanda mínima muestra un mayor impacto en la calidad de la frecuencia eléctrica, con mayor desviación estándar y un nadir más alejado del valor nominal.

#### 3. Importancia del diseño y control en condiciones de baja demanda:

- El análisis confirma que las perturbaciones tienen un efecto más notable en escenarios con menor carga. Esto enfatiza la necesidad de estrategias específicas para mitigar las fluctuaciones en estos casos.

#### 4. Viabilidad técnica de la micro-red:

- A pesar de las diferencias observadas entre los escenarios, la micro-red de la UPB demuestra una capacidad sólida para mantener la estabilidad de



# UPB Smart Energy Center (SEC)

Conocimiento al servicio de la transición energética, inteligente y sostenible

frecuencia dentro de límites aceptables, alineándose con los estándares técnicos nacionales e internacionales.

## 7.2. Recomendaciones

1. **Implementación de estrategias de control en escenarios de baja demanda:**
  - Diseñar e implementar controladores avanzados que respondan de manera adaptativa a condiciones de baja inercia, como el uso de sistemas de almacenamiento de energía para estabilizar la frecuencia durante perturbaciones.
2. **Monitoreo continuo y ajustes dinámicos:**
  - Instalar sistemas de monitoreo en tiempo real que permitan identificar condiciones críticas de operación y activar estrategias de mitigación antes de que se produzcan desviaciones significativas.
3. **Optimización de la integración renovable:**
  - Explorar la posibilidad de agregar sistemas de respaldo o tecnologías de almacenamiento adicionales para absorber los impactos de la desconexión de fuentes renovables, especialmente en horarios de baja demanda.
4. **Simulación de escenarios críticos:**
  - Realizar simulaciones adicionales que incluyan eventos más severos, como fallas en múltiples generadores, para evaluar la resiliencia de la micro-red y la efectividad de las estrategias propuestas.
5. **Capacitación del personal técnico:**
  - Capacitar al personal de la UPB en la operación y mantenimiento de sistemas eléctricos avanzados, asegurando que las estrategias de mitigación puedan ser implementadas y supervisadas adecuadamente.
6. **Divulgación de los resultados:**
  - Compartir los hallazgos con otras instituciones académicas y operadores de micro-redes para contribuir al desarrollo de mejores prácticas en la gestión de sistemas eléctricos basados en energía renovable.

## 8. REFERENCIAS

- [1] Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), Código de Redes Resolución 025, Julio 1995.
- [2] IEC Short-Circuit Currents in Three-Phase A.C. Systems 60909.
- [3] Norma Internacional IEEE 1547-2003, IEEE 1547.1-2008 “Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems”
- [4] Resolución CREG 030 de 2018 “Por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el sistema interconectado Nacional”.

***ANEXO 1: DIAGRAMAS UNIFILARES***

***ANEXO 2: ANÁLISIS FLUJO DE CARGA***

***ANEXO 3: ANÁLISIS CORTO CIRCUITO***