

UBICACIÓN ÓPTIMA PARA RECARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN UNA  
RED DE MEDIA TENSIÓN

MARLON JULIÁN SILVA RODRÍGUEZ  
FERNAN ADOLFO VEGA TORRES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2019

UBICACIÓN ÓPTIMA PARA RECARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN UNA  
RED DE MEDIA TENSIÓN

MARLON JULIÁN SILVA RODRÍGUEZ  
FERNAN ADOLFO VEGA TORRES

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Electricista

Director:

JAVIER ENRIQUE SOLANO MARTINEZ  
Doctorado en Ingeniería Eléctrica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA

2019

## DEDICATORIA

*Primeramente, a Dios,  
Por su fidelidad.*

*A mi padre,  
Quien me guio y corrigió para ser una excelente persona y un gran profesional,  
quien estuvo conmigo en los momentos más difíciles.*

*A mi madre,  
Quien me apoyo incondicionalmente me dio fuerzas desde lejos y siempre fue mi  
mejor consejera.*

*A mis hermanos,  
Que siempre estuvieron cuando los necesite y aun lo siguen estando.*

*A mi novia,  
Por su motivación y gran apoyo en los momentos difíciles*

*A todos y cada uno de mis compañeros que estuvieron durante este proceso que  
aportaron a mi crecimiento personal y profesional.*

**Fernan Adolfo Vega Torres**

## DEDICATORIA

*Primeramente, a Dios,*

*Quien me ha dado fortaleza durante todo este camino.*

*A mis padres,*

*Por ser mi mayor motivación para estudiar esta carrera y enseñarme a ser siempre fuerte en los momentos más difíciles.*

*A mis hermanos,*

*Por estar pendientes y brindarme su apoyo en cada uno de los pasos que voy recorriendo*

*A los amigos que he conocido a lo largo de esta carrera,*

*Por tan buenos y gratos momentos, que me ayudaron a sacar una sonrisa en los momentos difíciles.*

**Marlon Julián Silva Rodríguez**

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	14
1. OBJETIVOS	16
1.1 OBJETIVO GENERAL	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2. MARCO CONCEPTUAL	17
2.1 DEMANDA ENERGÉTICA	17
2.2 HORAS DE RECARGA	18
2.3 CO-SIMULACIONES	19
2.4 COMUNICACIÓN PROPUESTA MATLAB-DIGSILENT	21
3. METODOLOGÍA	23
3.1 ALGORITMO GENÉTICO	25
3.2 FUNCIONAMIENTO DEL ALGORITMO	25
3.3 DESVENTAJAS DEL ALGORITMO	28
4. SISTEMA DE RED IMPLEMENTADO	29
4.1 FUNCIÓN OBJETIVO	31
4.2 RESTRICCIÓN	31
5. ANÁLISIS Y RESULTADOS	32
6. CONCLUSIONES	37
7. TRABAJOS FUTUROS	38
BIBLIOGRAFÍA	39
ANEXOS	40

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Tipos de carga de vehículos eléctricos	17
<b>Tabla 2.</b> Numero de soluciones encontradas según la cantidad de estaciones a ubicar.	23
<b>Tabla 3.</b> Características del sistema de potencia.	30
<b>Tabla 4.</b> Ubicación de la primera estación de recarga.	32
<b>Tabla 5.</b> Ubicación de la segunda estación de recarga.	33
<b>Tabla 6.</b> Ubicación de la tercera estación de recarga.	33
<b>Tabla 7.</b> Ubicación de la primera estación de recarga eligiendo dos individuos.	34
<b>Tabla 8.</b> Ubicación de la segunda estación de recarga tomando el individuo uno.	34
<b>Tabla 9.</b> Ubicación de la segunda estación de recarga tomando el individuo dos.	35
<b>Tabla 10.</b> Ubicación de la tercera estación de recarga tomando el individuo uno.	35
<b>Tabla 11.</b> Ubicación de la tercera estación de recarga tomando el individuo dos.	36

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Curva de demanda diaria sector residencial estrato 6	18
<b>Figura 2.</b> Curva de demanda diaria sector comercial	19
<b>Figura 3.</b> Comunicación DigSILENT PowerFactory y Matlab	20
<b>Figura 4.</b> Comunicación DigSILENT PowerFactory y Python	21
<b>Figura 5.</b> Comunicación Propuesta DigSILENT PowerFactory y Matlab	22
<b>Figura 6.</b> Diagrama de flujo simplificado del algoritmo propuesto	24
<b>Figura 7.</b> Inicio del problema ejemplificado.	27
<b>Figura 8.</b> Ubicación de la primera estación	27
<b>Figura 9.</b> Ubicación de la segunda estación, con la primera estación ya fijada.	28
<b>Figura 10.</b> Diagrama unifilar de la red de media tensión.	29

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>Anexo A.</b> Función objetivo	41
<b>Anexo B.</b> Comunicación Matlab – DigSILENT	42
<b>Anexo C.</b> Comunicación DigSILENT – Matlab	43

## RESUMEN

**TÍTULO:** UBICACIÓN ÓPTIMA PARA RECARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN UNA RED DE MEDIA TENSIÓN.\*

**AUTORES:** FERNAN ADOLFO VEGA TORRES, MARLON JULIÁN SILVA RODRÍGUEZ\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Vehículo eléctrico, co-simulación, algoritmo genético, optimización.

### **DESCRIPCIÓN:**

En este trabajo de grado se plantea una metodología que permite la co-simulación entre los programas Matlab y PowerFactory DigSILENT, donde se simula una red de media tensión implementada en PowerFactory DigSILENT, por otra parte se implementa un algoritmo genético híbrido en Matlab donde consta de dos partes, la primera es un método de búsqueda exhaustiva y la segunda es aplicando el criterio del elitismo puro, permitiendo encontrar la ubicación óptima de las estaciones de recarga. Para lograr lo anterior se crearon tres archivos .csv que permitieron establecer dicha co-simulación, uno de estos tres archivos contiene la información del proceso realizado en Matlab, el segundo de estos tres archivos contienen los cálculos eléctricos realizados en PowerFactory DigSILENT y el faltante es el que permite el funcionamiento secuencial ya sea de Matlab o de PowerFactory DigSILENT teniendo una comunicación de unos y ceros, la red implementada cuenta con 33 nodos en media tensión. Realizar esta metodología es de gran importancia, ya que la localización de una estación de recarga para vehículos eléctricos trae consigo altas exigencias al sistema de distribución de energía eléctrica, la conexión de carga adicional en el sistema de potencia provoca caídas de tensión, sobrecarga en transformadores y aumento de las pérdidas en la red de distribución.

---

\*Trabajo de grado

\*\* Universidad Industrial De Santander, Facultad De Ingenierías Físico Mecánicas, Escuela De Ingenierías Eléctrica, Electrónica Y De Telecomunicaciones. Director: SOLANO MARTINEZ, Javier Enrique. Doctorado en Ingeniería Eléctrica

## ABSTRACT

**TITLE:** UBICACIÓN ÓPTIMA PARA RECARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN UNA RED DE MEDIA TENSIÓN.\*

**AUTHORS:** FERNAN ADOLFO VEGA TORRES, MARLON JULIÁN SILVA RODRÍGUEZ\*\*

**KEYWORDS:** Electric vehicle, co-simulation, genetic algorithm, optimization.

### DESCRIPTION:

In this degree work we propose a methodology that allows co-simulation between the programs Matlab and PowerFactory DigSILENT, which simulates a medium voltage network implemented in PowerFactory DigSILENT, on the other hand implements a hybrid genetic algorithm in Matlab which consists of two parts, the first is an exhaustive search method and the second is applying the criterion of pure elitism, allowing to find the optimal location of the recharging stations. In order to achieve the above, three .csv files were created that allowed to establish this co-simulation, one of these three files contains the information of the process carried out in Matlab, the second of these three files contains the electrical calculations carried out in PowerFactory DigSILENT and the missing one is the one that allows the sequential operation of either Matlab or PowerFactory DigSILENT having a communication of ones and zeros, the network implemented has 33 nodes in medium voltage. Performing this methodology is of great importance, since the location of a recharging station for electric vehicles brings with it high demands to the electric power distribution system, the connection of additional charge in the power system causes voltage drops, overload in transformers and increased losses in the distribution network.

---

\*Degree Paper

\*\* Universidad Industrial De Santander, Facultad De Ingenierías Físico Mecánicas, Escuela De Ingenierías Eléctrica, Electrónica Y De Telecomunicaciones. Director: SOLANO MARTINEZ, Javier Enrique. Doctorado en Ingeniería Eléctrica

## INTRODUCCIÓN

Los vehículos híbridos y eléctricos son considerados como una posible solución para reducir las emisiones contaminantes en el planeta. La masificación de estos vehículos requiere que se desarrollen estaciones de recarga en los centros urbanos y en las residencias de los usuarios. Este trabajo tiene como objetivo proponer un algoritmo que permita encontrar la ubicación óptima de estaciones de recarga de vehículos eléctricos en redes de distribución.

Trabajos previos en la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicación (E3T) de la Universidad Industrial de Santander han tratado de resolver este problema. Uno de estos es el trabajo desarrollado por Ardila y Ochoa (2018) quienes implementaron un algoritmo genético para encontrar la ubicación óptima de estaciones de recarga. Este trabajo fue desarrollado únicamente en *Matlab*. Los operadores de red utilizan *software* para modelar sistemas de distribución, el más usado en la industria colombiana es DigSILENT PowerFactory.

En este trabajo de grado se busca desarrollar una herramienta para la ubicación óptima de estaciones de recarga utilizando DigSILENT PowerFactory; sin embargo, el modelo de la red no va a ser simulado en *Matlab*, sino que se tomará un modelo con los que ya cuenta DigSILENT PowerFactory. El desafío de este problema es definir una pasarela que permita comunicar *Matlab* con DigSILENT PowerFactory.

Se utiliza *Matlab* para desarrollar el algoritmo de Ubicación Óptima de Estaciones de Recarga (UOER), pues cuenta con excelentes herramientas que permiten hacer análisis de los datos y desarrollo de algoritmos. La red se implementará en DigSILENT PowerFactory por su excelente análisis en simulaciones. La

Universidad Industrial de Santander cuenta con licencias para el uso de estos dos programas.

Con trabajo de grado se permitirá en un futuro brindar servicios a cualquier operador de red o entidad que tenga un sistema distribución, y encontrar la ubicación óptima de estaciones de recarga.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1 OBJETIVO GENERAL

Implementar en *Matlab* un algoritmo para la ubicación óptima de estaciones de recarga de vehículos eléctricos en una red de media tensión, con el soporte de DigSILENT para los cálculos eléctricos.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar un script para la modificación de parámetros de un modelo de red en media tensión implementada en DigSILENT PowerFactory.
- Implementar un algoritmo genético en *Matlab* que permita resolver la función objetivo del problema de ubicación óptima de estaciones de recarga en una red de media tensión.
- Desarrollar una interfaz de comunicación *MatLab* – DigSILENT para la solución secuencial de la función objetivo y de los cálculos eléctricos.

## 2. MARCO CONCEPTUAL

### 2.1 DEMANDA ENERGÉTICA

El auge de los vehículos eléctricos en Colombia ha hecho que la demanda aumente en las redes de distribución. Estas redes están dimensionadas para suplir la demanda de los usuarios. Los vehículos eléctricos, vistos desde la red, son semejantes a una batería. Estos vehículos eléctricos tienen diferentes tipos de carga, tal y como se muestra en la Tabla 1

**Tabla 1.** Tipos de carga de vehículos eléctricos

	BÁSICA	SEMI-RÁPIDA	RÁPIDA	SUPER-RÁPIDA
<b>POTENCIA</b>	<b>2,3 - 7,4 kW</b> Carga monofásica	<b>22 kW</b> Carga trifásica	<b>40 - 50 kW</b> Carga trifásica / continua	<b>100 - 150 kW</b> Carga en continua
<b>TIEMPO DE RECARGA PARA NECESIDAD DE MOVILIDAD MEDIA DIARIA</b>	<b>2,6 h - 48 min</b>	<b>16 min</b>	<b>9 - 7,2 min</b>	<b>3,6 - 2,4 min</b>
<b>TIEMPO DE RECARGA DEL 80% DE UNA BATERÍA DE 40 kWh</b>	<b>14 - 4,3 horas</b>	<b>1,5 horas</b>	<b>48 - 38 min</b>	<b>19,2 - 12,8 min</b>
<b>COSTE DEL SISTEMA DE RECARGA</b>	<b>500 - 1.500 €</b>	<b>A partir de 2.500 €</b>	<b>20.000-30.000 €</b>	<b>Mas de 100.000 €</b>

**Fuente:** Guía de movilidad eléctrica para las entidades locales, 2019, p. 16.

La autonomía en los vehículos ha mejorado para largas distancias, lo que ha conllevado a fabricar baterías más robustas que entreguen más potencia. De igual modo, las estaciones de recarga tienen dos versiones: de carga lenta y de carga rápida.

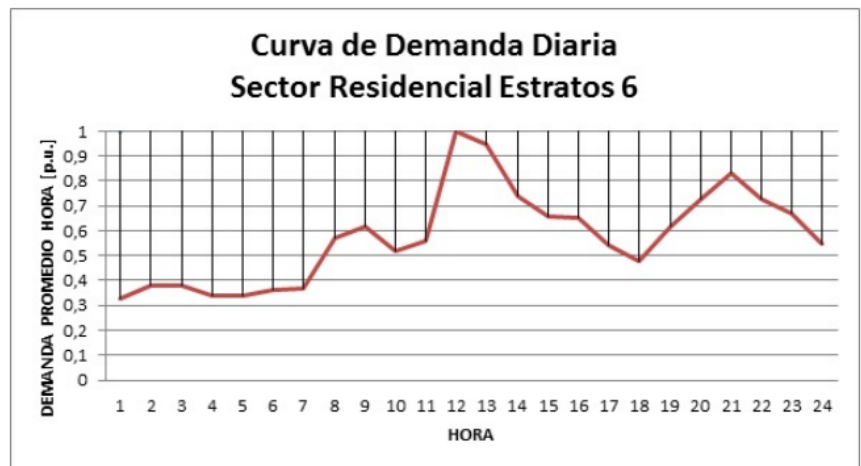
Las estaciones de carga lenta no son un problema para la red eléctrica, ya que las recargas se pueden hacer en un modelo lento donde se pueda asegurar la

capacidad de abastecimiento. Este sistema se puede implementar como apoyo donde se implementa la carga rápida (Guía de movilidad eléctrica para las entidades locales, 2019).

La integración de la recarga rápida a la red se ha presentado como un reto. Las estaciones de recarga con más de 50kW requieren de la implementación de una subestación de transformación dedicada con un número limitado de puntos de recarga simultáneos (Guía de movilidad eléctrica para las entidades locales, 2019).

## 2.2 HORAS DE RECARGA

La conexión de los vehículos eléctricos a la red también puede ser seleccionada por escenarios de demanda, sea del sector comercial o del sector residencial, estas demandas se representan en las figuras 1 y 2.



FUENTE: [Electrificadora de Santander Grupo EPM]

**Figura 1.** Curva de demanda diaria sector residencial estrato 6



FUENTE: [Electrificadora de Santander Grupo EPM]

**Figura 2.** Curva de demanda diaria sector comercial

Los valles en las curvas de las demandas diarias es la solución para la conexión de los vehículos según los resultados obtenidos por Rangel y Jaimes (2017) en la Universidad Industrial de Santander quienes usaron el software DigSILENT PowerFactory para adelantar el diagnóstico a la red simulada.

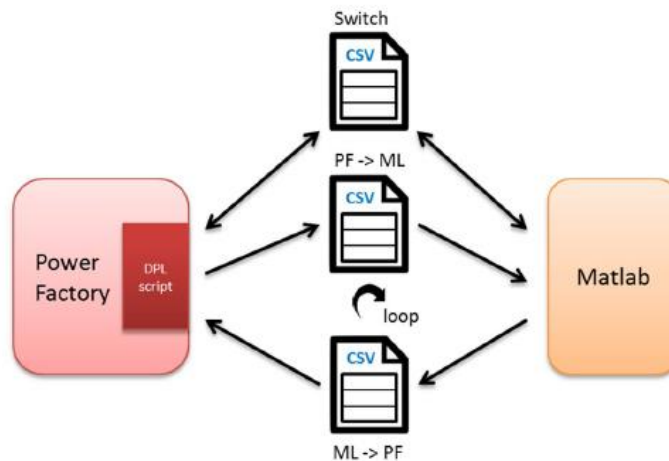
### 2.3 CO-SIMULACIONES

Las co-simulaciones se implementan para que dos programas de forma separada den solución a un mismo objetivo. DigSILENT PowerFactory cuenta con dos tipos de lenguaje para la programación, uno es el lenguaje DPL y el otro que se presenta es el lenguaje de programación de código abierto Python. DPL es el lenguaje central donde se puede interactuar con los objetos/elementos internos del modelo por medio de funciones, modificando parámetros y variables para luego generar resultados.

Los objetos de comando DPL se pueden dividir en:

- Comandos raíz, que tienen sus propios scripts en la página Script del cuadro de diálogo.
- Comandos de referencia, que utilizan los scripts de comandos remotos DPL adaptando solo parámetros de entrada, salida y objetos externos (DigSILENT PowerFactory, User Manual, 2017).

Esta información de entrada se puede evaluar utilizando funciones y variables internas dentro del script. También se pueden usar y ejecutar objetos internos. De esta forma, la comunicación entre DigSILENT PowerFactory y *Matlab* se hace por medio del comando DPL como lo hicieron Tabatabaei, Aghbolaghi, Boushehri & Parast (2017) y Latif, Shahzad, Palensky & Gawlik (2015).

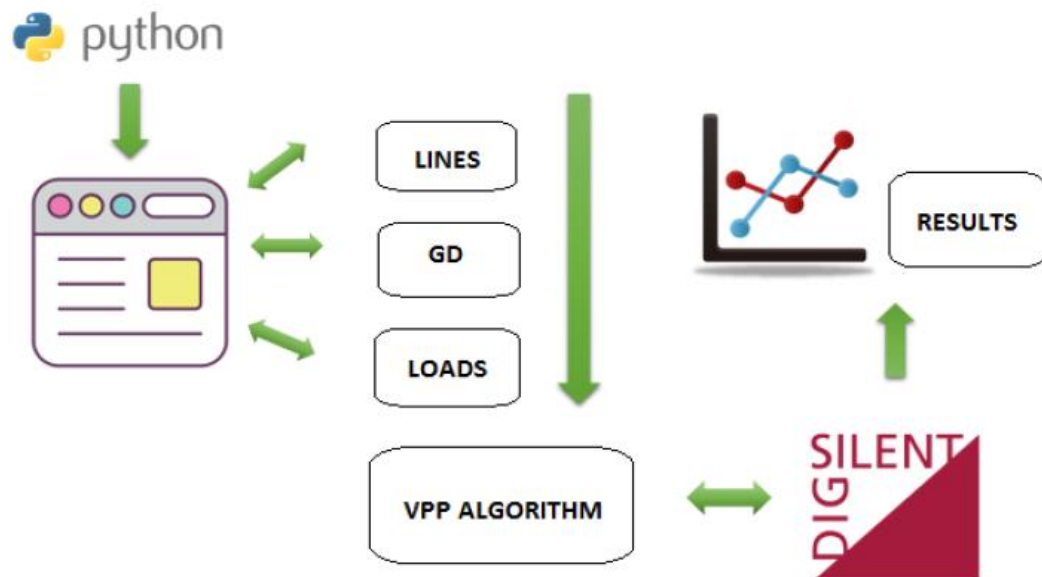


**Figura 3.** Comunicación DigSILENT PowerFactory y Matlab [4]

**Fuente:** Latif, Shahzad, Palensky & Gawlik, 2015, p. 487.

Además de DPL, también es posible utilizar el lenguaje Python para escribir scripts para ejecutar en PowerFactory. Los scripts de Python deben escribirse en un editor externo y vincularse al comando Python (ComPython) dentro de PowerFactory.

Conociendo más la programación C y C++ el lenguaje Python es la mejor opción para la programación, pudiendo desde abrir el programa DigSILENT PowerFactory hasta cambiar los parámetros y variables deseadas, con solo ejecutar el script en Python. Como lo hicieron Medina, Avella & Rivas (2018) para la Plataforma de gestión para un VPP en un sistema eléctrico basado en Python y DigSILENT PowerFactory.



**Figura 4.** Comunicación DigSILENT PowerFactory y Python [5]

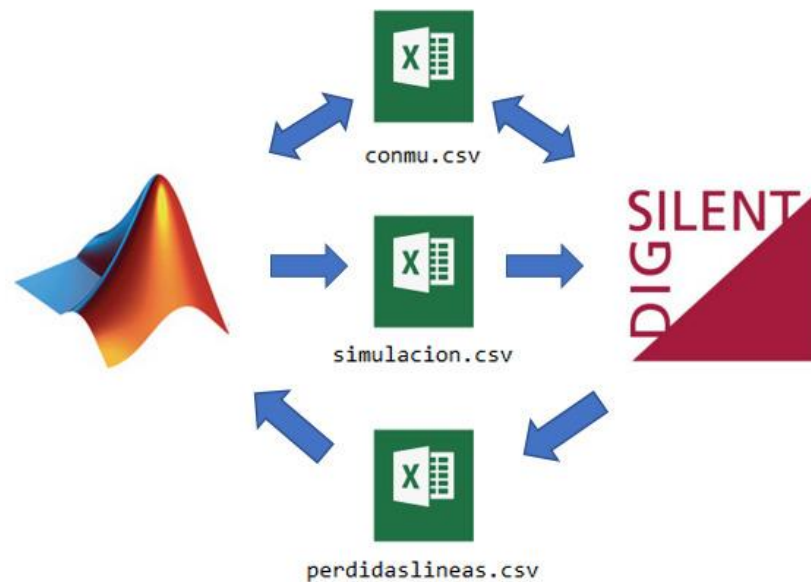
**Fuente:** Medina, Avella & Rivas, 2018, p. 14931

## 2.4 COMUNICACIÓN PROPUESTA MATLAB-DIGSILENT

El propósito de usar estos programas juntos es asociar las ventajas de ambas plataformas para resolver problemas del sistema de una manera más práctica.

En la Figura 5, se muestra el procedimiento de comunicación para el caso de estudio de este trabajo. El código automático de datos se escribe una parte en *Matlab* y la otra en el lenguaje de programación DigSILENT (DPL) a través de un

script. El intercambio de los datos se realiza utilizando tres archivos .csv: uno para transferir el valor de las cargas de *Matlab* a DigSilent, uno para transferir los datos obtenidos de DigSilent a *Matlab* y uno para la comunicación lectura/escritura de los programas. El archivo que permite la comunicación actúa como un interruptor que toma los valores 0 y 1. Si el valor del archivo de comunicación es 0, DigSilent lee el archivo que contiene los datos de las cargas, ejecuta comunicación Matlab-DigSilent, escribe el archivo que contiene la información necesaria exportada por DigSilent y Matlab espera. Por otro lado, si el valor del archivo de comunicación es 1, Matlab lee el archivo que contiene la información exportada por DigSilent, ejecuta un script en Matlab, escribe en el archivo que contiene los datos de las cargas y DigSilent espera. Durante este procedimiento, ambos programas escanean y cambian el valor del archivo de comunicación después de que cada uno de ellos termina su trabajo.



**Figura 5.** Comunicación Propuesta DigSILENT PowerFactory y Matlab

### 3. METODOLOGÍA

Se propone un algoritmo híbrido para encontrar la ubicación cuasióptima de  $k$  estaciones de recarga en un sistema de  $n$  barras. La solución a este problema si se considera que una barra puede alojar las  $k$  estaciones, tiene  $n^k$  soluciones,  $h$  es el número de soluciones posibles en donde no se permite una estación de recarga en el mismo nodo:

$$h = \prod_{i=0}^{k-1} n - i$$

Este problema puede tener un número alto de soluciones. Por ejemplo, para el sistema propuesto en el proyecto de Ardila y Ochoa (2018) de 33 barras para instalar  $k$  estaciones se tendrían una cantidad de soluciones presentada en la tabla 2.

**Tabla 2.** Numero de soluciones encontradas según la cantidad de estaciones a ubicar.

Cantidad de estaciones a ubicar	Permitiendo varias estaciones por nodo	Restringiendo una estación por nodo
1	33	33
2	1089	1056
3	35937	32736

Se presentará un método que en lugar de evaluar  $n^k$  soluciones, evalúa únicamente  $m$  soluciones, donde  $m$  toma la mejor solución de todas las iteraciones:

$$m = \sum_{i=0}^{k-1} n - i$$

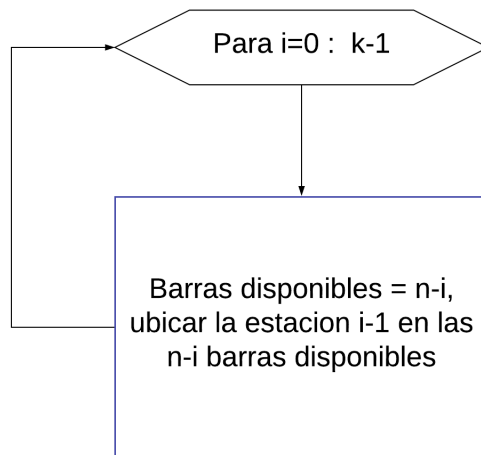
Tomando las dos mejores soluciones por iteración se tendrán  $l$  soluciones, donde:

$$l = n + 2(n - 1) + 2(n - 2) + \dots + 2(n - k)$$

Esta solución es cuasióptima ya que no se puede garantizar el óptimo de la solución; sin embargo, se quiere mostrar mediante uno caso de estudio que se puede estar muy cerca a la solución o en la solución óptima.

El algoritmo es un algoritmo iterativo que va a estar ubicando en cada iteración una única estación; por tal motivo, se tiene tantas iteraciones como estaciones de recargas queramos ubicar.

La figura 6 representa el diagrama de flujo del algoritmo que estamos proponiendo.



**Figura 6.** Diagrama de flujo simplificado del algoritmo propuesto

En cada iteración se busca encontrar la ubicación de una estación.

Para encontrar la ubicación de la primera estación, se evalúa la función objetivo cuando se ubica la estación en las  $n$  posibles barras, la solución óptima muestra la ubicación de la primera estación.

Para la iteración  $i$ , si no se permiten varias estaciones en la misma barra, tendremos  $n-i$  posibles barra disponible.

Se realiza una búsqueda en todas estas posibles barras, asumiendo que las estaciones que ya han sido identificadas se encuentran presentes como cargas en el sistema.

### **3.1 ALGORITMO GENÉTICO**

El algoritmo propuesto es un algoritmo híbrido conformado por dos criterios donde el primero es el método de búsqueda exhaustiva, el cual evalúa todas las posibles soluciones y escoge la mejor solución entre todas, por otra parte el segundo criterio se basa en el elitismo el cual consiste en seleccionar las mejores soluciones, y trasladarlas a la siguiente generación sin ninguna alteración, garantizando que el algoritmo genético no reducirá su calidad de generación.

### **3.2 FUNCIONAMIENTO DEL ALGORITMO**

Para encontrar la ubicación de la primera estación de recarga ( $i=1$ ), se corren  $n$  flujos de potencia ubicando la estación en cada una de las  $n$  barras disponibles. Esta estación se ubicará en la barra que minimice las pérdidas en el sistema.

Para encontrar la ubicación de la  $i$ -ésima estación de recarga ( $k=i$ ), se corren  $n-i+1$  flujos de potencia ubicando la estación en cada una de las  $n-i+1$  barras disponibles. Esta estación se ubicará en la barra que minimice las pérdidas en el sistema.

Para la primera iteración, vamos a tener  $n$  barras disponibles, se evalúa la ubicación de la estación de recarga en todas las  $n$  barras y se determina cuál es la mejor, dependiendo de cuál es la función objetivo definida.

Para las iteraciones siguientes, donde ya se han ubicado estas estaciones, las barras no se encuentran disponibles, por ejemplo, para un sistema de 9 barras, se busca encontrar la ubicación para 2 estaciones de recarga, las soluciones posibles serían 72. Sin embargo, con nuestro algoritmo solo tendríamos 2 iteraciones de los dos programas.

En la primera iteración, se busca la ubicación óptima de la primera estación, esta se ubica en la primera barra (b1).

En la segunda iteración, se buscaría ubicar la segunda estación en las barras disponibles (b2 b3 b4 b5 b6 b7 b8 b9), si la mejor ubicación para la segunda estación bajo estas condiciones. En las figuras 7, 8 y 9 se representa la solución del ejemplo presentado.

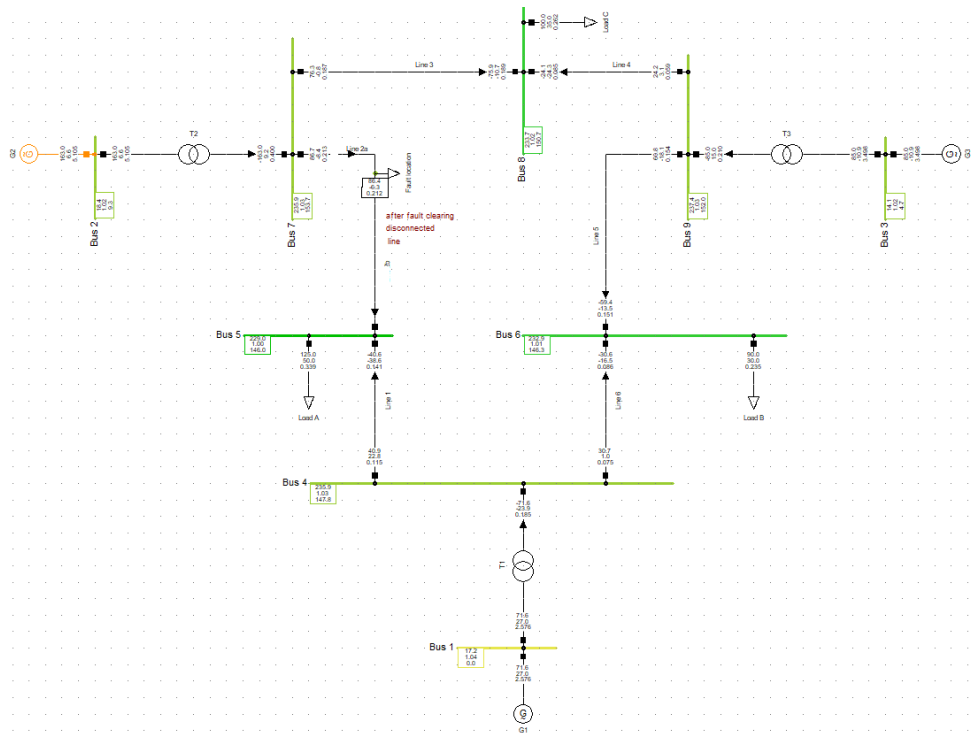


Figura 7. Inicio del problema ejemplificado.

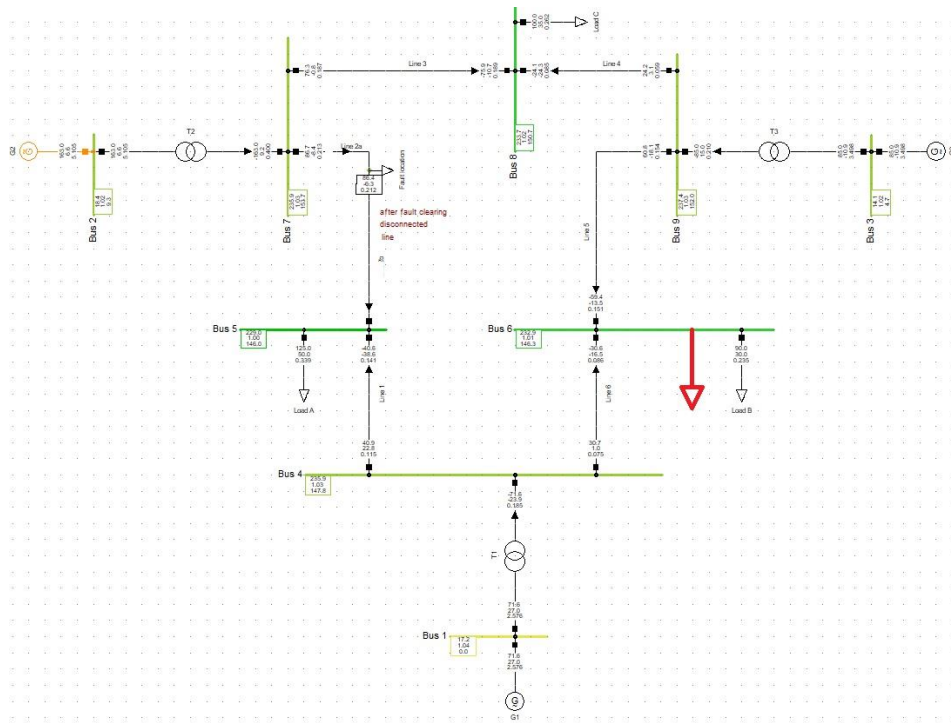
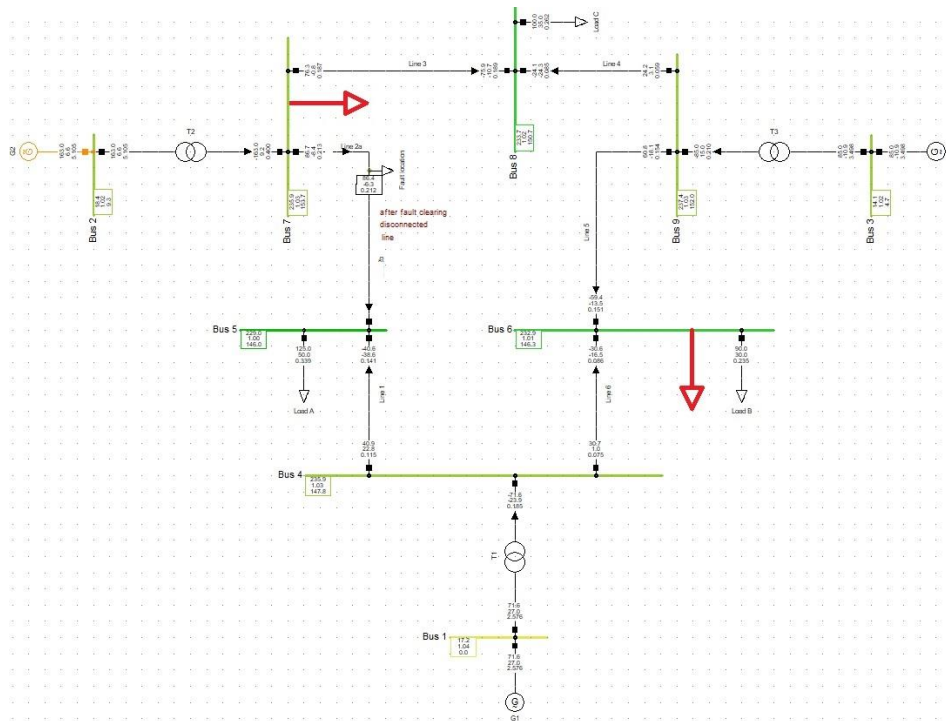


Figura 8. Ubicación de la primera estación



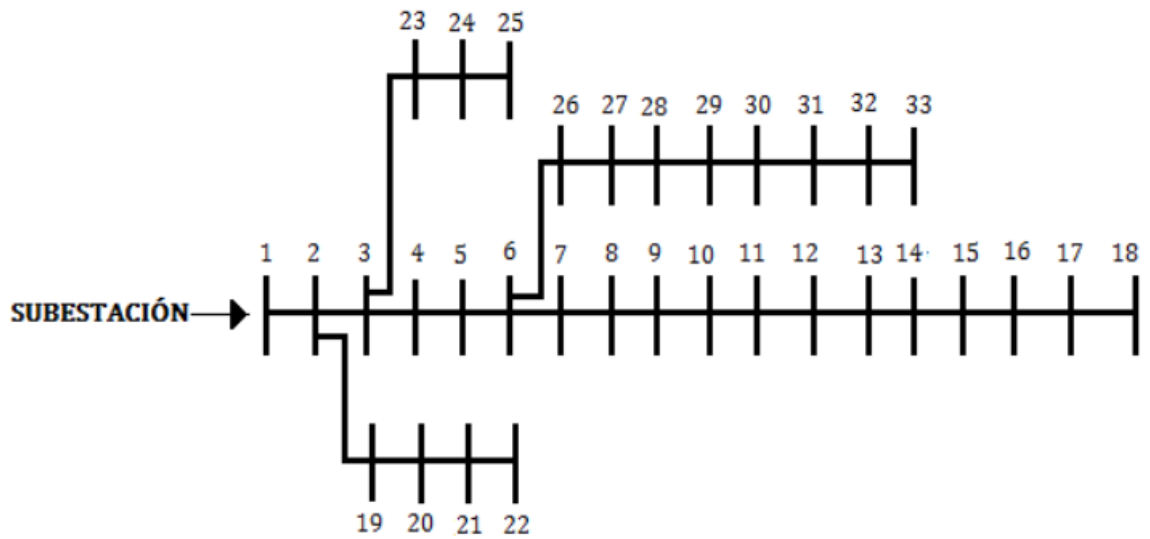
**Figura 9.** Ubicación de la segunda estación, con la primera estación ya fijada.

### 3.3 DESVENTAJAS DEL ALGORITMO

El algoritmo desarrollado en este trabajo de grado es un algoritmo heurístico, el cual no garantiza que vamos a encontrar el óptimo de la solución; sin embargo, en las siguientes secciones vamos a analizar para una red de distribución si el algoritmo nos permite encontrar la solución óptima o qué tan lejos estamos del óptimo.

#### 4. SISTEMA DE RED IMPLEMENTADO

En esta sección, se presentará el Sistema de Distribución de Energía Eléctrica (SDEE) presentado en el trabajo realizado por Ardila y Ochoa (2018), quienes extraen la información del trabajo de maestría en Eficiencia Energética de Looor Toro (2014). Más adelante se muestran algunas tablas con su respectiva información. En la figura 10, se observa la topología del sistema.



**Figura 10.** Diagrama unifilar de la red de media tensión.

**Fuente:** Ardila y Ochoa, 2018, p.32.

En la tabla 3, se encuentra información complementaria del SDEE como: potencia de la carga, la resistencia y la reactancia de cada uno con sus valores en por unidad (pu), con las siguientes bases:  $S_{base} = 1 [MVA]$  y  $V_{base} = 12,66 [kV]$ .

**Tabla 3.** Características del sistema de potencia.

Line No	From Bus	To Bus	R $\Omega$	X $\Omega$	R Pu	X pu	Load Receiving End Bus	
							Real Power Load (kW)	Reactive Power Load (kVAR)
1	1	2	0,0922	0,0470	0,0006	0,0003	100	60
2	2	3	0,4930	0,2511	0,0031	0,0016	90	40
3	3	4	0,366	0,1864	0,0023	0,0012	120	80
4	4	5	0,3811	0,1941	0,0024	0,0012	60	30
5	5	6	0,8190	0,7070	0,0051	0,0044	60	20
6	6	7	0,1872	0,6188	0,0012	0,0039	200	100
7	7	8	1,7114	1,2351	0,0044	0,0015	200	100
8	8	9	1,0300	0,7400	0,0064	0,0046	60	20
9	9	10	1,0440	0,7400	0,0065	0,0046	60	20
10	10	11	0,1966	0,0650	0,0012	0,00041	45	30
11	11	12	0,3744	0,1238	0,0023	0,0008	60	35
12	12	13	1,4680	1,1550	0,0092	0,0072	60	35
13	13	14	0,5416	0,7129	0,0034	0,0044	120	80
14	14	15	0,5910	0,5260	0,0037	0,0033	60	10
15	15	16	0,7463	0,5450	0,0047	0,0034	60	20
16	16	17	1,2890	1,7210	0,0080	0,0107	60	20
17	17	18	0,7320	0,5740	0,0046	0,0036	90	40
18	18	19	0,1640	0,1565	0,0010	0,0010	90	40
19	19	20	1,5042	1,3554	0,0094	0,0085	90	40
20	20	21	0,4095	0,4784	0,0026	0,0030	90	40
21	21	22	0,7089	0,9373	0,0044	0,0058	90	40
22	22	23	0,4512	0,3083	0,0028	0,0019	90	50
23	23	24	0,8980	0,7091	0,0056	0,0044	420	200
24	24	25	0,8960	0,7011	0,0056	0,0044	420	200
25	25	26	0,2030	0,1034	0,0013	0,0006	60	25
26	26	27	0,2842	0,1447	0,0018	0,0009	60	25
27	27	28	1,0590	0,9337	0,0066	0,0058	60	20
28	28	29	0,8042	0,7006	0,0050	0,0044	120	70
29	29	30	0,5075	0,2585	0,0032	0,0016	200	600
30	30	31	0,9744	0,9630	0,0061	0,0060	150	70
31	31	32	0,3105	0,3619	0,0019	0,0023	210	100
32	32	33	0,3410	0,5302	0,0021	0,0033	60	40

Fuente: Ardila y Ochoa, 2018, pp.32-33.

#### 4.1 FUNCIÓN OBJETIVO

La función objetivo está definida por dos modelos de ecuación (1) y (2):

$$P_{ti} = \sum P_b + \sum(S_i) * P_{ER} \quad (1)$$

La ecuación 1, indica la suma de potencias en el sistema para cada iteración, conformada por dos partes:

La primera, consiste en la suma de potencia en las barras de todo el sistema, sin la estación de recarga. La segunda, en la suma de potencia de la carga, representada por la estación de recarga,  $S_i$  es la ubicación seleccionada por el algoritmo y  $P_{ER}$  es la carga establecida para la estación de recarga.

$$\min P_{lt} = \min[P_{lt1}, P_{lt2}, P_{lt3}, \dots, P_{lti}] \quad (2)$$

$$P_{lti} = [P_{l1} + P_{l2} + P_{l3} + \dots + P_{lm}] \quad (3)$$

La ecuación 2, después de haber corrido el flujo de potencia, selecciona el valor mínimo de las pérdidas en las líneas, con la estación de recarga ubicada en cada una de las barras. Donde  $P_{lti}$  son las pérdidas en las  $m$  líneas totales de cada iteración, ver ecuación 3.

En este ejemplo, representado en la ecuación 4, se puede observar una solución para la ubicación de la estación de recarga en la barra 5, donde  $b$  es el número de barras del sistema.

$$S_i = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots]_{1 \times b} \quad (4)$$

#### 4.2 RESTRICCIÓN

La ecuación 5 nos indica la penalización del sistema, la tensión no puede pasar un 5 % por arriba o por abajo en ninguna de las barras del sistema.

$$V_{min} \leq V_b \leq V_{max} \quad \forall b \in N \quad (5)$$

## 5. ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos al dar solución a los diferentes escenarios planteados. Los resultados se presentarán mostrando la ubicación de la Estación de Recarga de Vehículos Eléctricos (ERV).

Para corroborar el correcto funcionamiento del algoritmo, en el primer escenario se presentan los resultados al ubicar un ERV teniendo en cuenta las pérdidas de potencia. Se encontró la solución mediante el método de búsqueda exhaustiva y elitismo, en el cual se evalúa cada solución posible en la función objetivo.

En las tablas 4, 5 y 6 se muestran los resultados al elegir solo un individuo como el mejor.

**Tabla 4.** Ubicación de la primera estación de recarga.

Número de Barra	Pérdidas [kW]	Número de Barra	Pérdidas [kW]
1	<b>220.0936</b>	17	227.7560
2	220.3075	18	227.8263
3	221.3417	19	220.3426
4	221.8996	20	220.5905
5	222.4608	21	220.6376
6	223.6831	22	220.6830
7	223.9973	23	221.6021
8	225.1606	24	222.0790
9	225.7233	25	222.3268
10	226.2540	26	224.1396
11	226.3431	27	224.3274
12	226.5002	28	225.0059
13	227.0722	29	225.4939
14	227.2663	30	225.7491
15	227.4128	31	226.1044
16	227.5589		

Como se puede observar en la tabla 4, el resultado es el esperado, ya que la ERV quedó ubicada en el primer nodo, el cual es el más cercano a la subestación y por

ende las pérdidas son las menores. Para evitar que la ERV quede ubicada en el mismo nodo, se hace necesario aplicar el criterio del algoritmo junto con las restricciones del modelo matemático. En el caso de dos y tres, como se representa en la tabla 5 y 6.

**Tabla 5.** Ubicación de la segunda estación de recarga.

Número de Barra	Pérdidas [kW]	Número de Barra	Pérdidas [kW]
1 y 2	<b>220.3075</b>	1 y 19	220.3426
1 y 3	221.3417	1 y 20	220.5905
1 y 4	221.8996	1 y 21	220.6376
1 y 5	222.4608	1 y 22	220.6830
1 y 6	223.6831	1 y 23	221.6021
1 y 7	223.9973	1 y 24	222.0790
1 y 8	225.1606	1 y 25	222.3268
1 y 9	225.7233	1 y 26	224.1396
1 y 10	226.2540	1 y 27	224.3274
1 y 11	226.3431	1 y 28	225.0059
1 y 12	226.5002	1 y 29	225.4939
1 y 13	227.0722	1 y 30	225.7491
1 y 14	227.2663	1 y 31	226.1044
1 y 15	227.4128	1 y 32	226.1810
1 y 16	227.5589	1 y 33	226.2055
1 y 17	227.7560		
1 y 18	227.8263		

**Tabla 6.** Ubicación de la tercera estación de recarga.

Número de Barra	Pérdidas [kW]	Número de Barra	Pérdidas [kW]
1,2 y 3	221.5580	1,2 y 18	228.0433
1,2 y 4	222.1159	1,2 y 19	<b>220.5587</b>
1,2 y 5	222.6772	1,2 y 20	220.8067
1,2 y 6	223.8996	1,2 y 21	220.8538
1,2 y 7	224.2139	1,2 y 22	220.8991
1,2 y 8	225.3773	1,2 y 23	221.8184
1,2 y 9	225.9401	1,2 y 24	222.2953
1,2 y 10	226.4708	1,2 y 25	222.5431
1,2 y 11	226.5599	1,2 y 26	224.3561
1,2 y 12	226.7171	1,2 y 27	224.5440
1,2 y 13	227.2892	1,2 y 28	225.2226
1,2 y 14	227.4832	1,2 y 29	225.7106
1,2 y 15	227.6298	1,2 y 30	225.9659
1,2 y 16	227.7759	1,2 y 31	226.3212
1,2 y 17	227.9730	1,2 y 32	226.3978
		1,2 y 33	226.4223

En el siguiente escenario se muestran las pérdidas al elegir dos individuos como los mejores y llevándolos a las siguientes generaciones.

**Tabla 7.** Ubicación de la primera estación de recarga eligiendo dos individuos.

Número de Barra	Pérdidas [kW]	Número de Barra	Pérdidas [kW]
1	<b>220.0936</b>	17	227.7560
2	<b>220.3075</b>	18	227.8263
3	221.3417	19	220.3426
4	221.8996	20	220.5905
5	222.4608	21	220.6376
6	223.6831	22	220.6830
7	223.9973	23	221.6021
8	225.1606	24	222.0790
9	225.7233	25	222.3268
10	226.2540	26	224.1396
11	226.3431	27	224.3274
12	226.5002	28	225.0059
13	227.0722	29	225.4939
14	227.2663	30	225.7491
15	227.4128	31	226.1044
16	227.5589	32	226.1810
		33	226.2055

Los dos mejores individuos estuvieron localizados en las dos primeras barras del sistema, donde con estos se volvió a correr el flujo de potencia para cada una de las posibles ubicaciones de la estación de recarga.

**Tabla 8.** Ubicación de la segunda estación de recarga tomando el individuo uno.

Número de Barra	Pérdidas [kW]	Número de Barra	Pérdidas [kW]
1 y 2	<b>220.3075</b>	1 y 17	227.7560
1 y 3	<b>221.3417</b>	1 y 18	227.8263
1 y 4	221.8996	1 y 19	220.3426
1 y 5	222.4608	1 y 20	220.5905
1 y 6	223.6831	1 y 21	220.6376
1 y 7	223.9973	1 y 22	220.6830
1 y 8	225.1606	1 y 23	221.6021
1 y 9	225.7233	1 y 24	222.0790
1 y 10	226.2540	1 y 25	222.3268
1 y 11	226.3431	1 y 26	224.1396
1 y 12	226.5002	1 y 27	224.3274
1 y 13	227.0722	1 y 28	225.0059
1 y 14	227.2663	1 y 29	225.4939
1 y 15	227.4128	1 y 30	225.7491
1 y 16	227.5589	1 y 31	226.1044
		1 y 32	226.1810
		1 y 33	226.2055

**Tabla 9.** Ubicación de la segunda estación de recarga tomando el individuo dos.

Número de Barra	Pérdidas [kW]	Número de Barra	Pérdidas [kW]
2 y 1	220.3075	2 y 17	227.973
2 y 3	221.5580	2 y 18	228.0433
2 y 4	222.1159	2 y 19	220.5587
2 y 5	222.6772	2 y 20	220.8067
2 y 6	223.8996	2 y 21	220.8538
2 y 7	224.2139	2 y 22	220.8991
2 y 8	225.3773	2 y 23	221.8184
2 y 9	225.9401	2 y 24	222.2953
2 y 10	226.4708	2 y 25	222.5431
2 y 11	226.5599	2 y 26	224.3561
2 y 12	226.7171	2 y 27	224.544
2 y 13	227.2892	2 y 28	225.2226
2 y 14	227.4832	2 y 29	225.7106
2 y 15	227.6298	2 y 30	225.9659
2 y 16	227.7759	2 y 31	226.3212
		2 y 32	226.3978
		2 y 33	226.4223

En los resultados de las tablas 8 y 9 se observa que los dos mejores individuos tomados de los anteriores resultados son la solución 1-2 y 1-3 donde por criterio del método de elegir los dos mejores de cada iteración se descartan las soluciones que se encuentran en la tabla 9.

**Tabla 10.** Ubicación de la tercera estación de recarga tomando el individuo uno.

Número de Barra	Pérdidas [kW]	Número de Barra	Pérdidas [kW]
1,2 y 3	221.5580	1,2 y 18	228.0433
1,2 y 4	222.1159	1,2 y 19	<b>220.5587</b>
1,2 y 5	222.6772	1,2 y 20	220.8067
1,2 y 6	223.8996	1,2 y 21	220.8538
1,2 y 7	224.2139	1,2 y 22	220.8991
1,2 y 8	225.3773	1,2 y 23	221.8184
1,2 y 9	225.9401	1,2 y 24	222.2953
1,2 y 10	226.4708	1,2 y 25	222.5431
1,2 y 11	226.5599	1,2 y 26	224.3561
1,2 y 12	226.7171	1,2 y 27	224.5440
1,2 y 13	227.2892	1,2 y 28	225.2226
1,2 y 14	227.4832	1,2 y 29	225.7106
1,2 y 15	227.6298	1,2 y 30	225.9659
1,2 y 16	227.7759	1,2 y 31	226.3212
1,2 y 17	227.9730	1,2 y 32	226.3978
		1,2 y 33	226.4223

**Tabla 11.** Ubicación de la tercera estación de recarga tomando el individuo dos.

Número de Barra	Pérdidas [kW]	Número de Barra	Pérdidas [kW]
1,3 y 2	<b>221.558</b>	1,3 y 18	229.0949
1,3 y 4	223.1637	1,3 y 19	221.5931
1,3 y 5	223.7253	1,3 y 20	221.841
1,3 y 6	224.9484	1,3 y 21	221.8881
1,3 y 7	225.2629	1,3 y 22	221.9335
1,3 y 8	226.4271	1,3 y 23	222.866
1,3 y 9	226.9903	1,3 y 24	223.3432
1,3 y 10	227.5213	1,3 y 25	223.5911
1,3 y 11	227.6105	1,3 y 26	225.4053
1,3 y 12	227.7678	1,3 y 27	225.5933
1,3 y 13	228.3402	1,3 y 28	226.2723
1,3 y 14	228.5344	1,3 y 29	226.7607
1,3 y 15	228.6811	1,3 y 30	227.0161
1,3 y 16	228.8272	1,3 y 31	227.3717
1,3 y 17	229.0246	1,3 y 32	227.4483
		1,3 y 33	227.4728

En las tablas 10 y 11, se obtuvieron las dos mejores soluciones, ubicando la tercera estación de recarga en las barras 1-2-19 y 1-3-2, si se quiere ubicar una cuarta estación de recarga se tomarían estos dos individuos para la ubicación óptima.

En los anexos D y E, los cuales se encuentran en formato digital, se detalla el método exhaustivo.

El resultado de este contraste entre el algoritmo propuesto y el método de búsqueda exhaustiva permite reducir los costos computacionales. De esta manera, con este trabajo de grado se permite encontrar la solución óptima en un tiempo menor a comparación de la búsqueda exhaustiva por sí sola, donde se requiere evaluar todas las soluciones posibles.

## 6. CONCLUSIONES

Se desarrolló una interfaz de comunicación *MatLab* – DigSILENT para la solución secuencial de la ubicación óptima de una estación de recarga con ayuda de archivos Excel .csv los cuales permitieron realizar dicha comunicación.

Se implementó un algoritmo en *Matlab* para la ubicación óptima de estaciones de recarga de vehículos eléctricos en una red de media tensión, con el soporte de DigSILENT para los cálculos eléctricos. Teniendo en cuenta que la comunicación con Matlab no está designada por el programa DigSILENT como lo hace con Phyton.

Por otra parte, el trabajo permitió desarrollar un script para la modificación de parámetros de un modelo de red en media tensión implementada en DigSILENT PowerFactory. Para ello, se elaboró un archivo Excel en el cual se genera y se extrae la información deseada para dicha modificación.

Finalmente, el algoritmo se desarrolló para no solo una ubicación de recarga, sino para encontrar las  $n$  estaciones de recarga deseadas.

## 7. TRABAJOS FUTUROS

Para trabajos futuros relacionados con este proyecto de grado, se recomienda mejorar la comunicación propuesta entre Matlab y PowerFactory DigSILENT. Para ello, se sugiere crear otro archivo de comunicación además del propuesto para que, al momento de que los dos programas entren a leer el archivo conmu.csv, no se produzca un error.

También se sugiere realizar las simulaciones con curvas de demanda, donde se puedan evidenciar las ubicaciones más óptimas con respecto a las horas de conexión de los usuarios.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ardila, B. A., y Ochoa, Y. J. (2018). Ubicación óptima de una estación de recarga pública para vehículos eléctricos en una red de distribución de energía eléctrica. [Trabajo de grado] Ingeniería Eléctrica. Universidad Industrial de Santander.
- Consejería de Economía y Hacienda Comunidad de Madrid. (2019). Guía del Vehículo Eléctrico II. Madrid: Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid
- Latif, A., Shahzad, M., Palensky, P., & Gawlik, W. (2015). An Alternative PowerFactory Matlab Coupling Approach. IEEE, pp. 486-491.
- Rangel, W. E., y Jaimes, C. L. (2017). Proyección de las redes de distribución eléctricas urbanas de uso residencial ante el escenario de masificación del vehículo eléctrico. [Trabajo de grado] Ingeniería Eléctrica. Universidad Industrial de Santander.
- Tabatabaei, M. N., Aghbolaghi, A. J., Boushehri, N. s., & Parast, F. H. (2017). Reactive Power Optimization Using MATLABand DlgSILENT. Chapter 11. Springer International Publishing. pp. 411- 474.
- Medina, V. H., Avella, C. A., & Rivas, E. (2018). Management Platform for a VPP in an Electric System base don Python and DlgSILENT. International Journal af Applied Engineering Research. 13 (21), 14930-14934

## **ANEXOS**

## Anexo A. Función objetivo

```
function f_obj=perdidas_calculadas_con_ayuda_de_PF(soluciones_v0)

    A=csvread('D:\Desktop\Prueba\Datos Cargas.csv');

    for i = 1:33 % El número 33 hace referencia a nuestro sistema implementado en caso de usar
    otro sistema de un numero diferente de barra este debe ser modificado
        s(i)=length(find(soluciones_v0==i));
    end

    Nueva_A=A+(s'.*44); % El valor 44 hace referencia a la potencia de la estación de recarga en
    kw
    csvwrite('D:\Desktop\Prueba\simulacion.csv',Nueva_A);

    csvwrite('D:\Desktop\Prueba\conmu.csv', 0); % Matlab terminó su trabajo

    ctlmd=csvread('D:\Desktop\Prueba\conmu.csv'); % Se lee el archivo creado

    while ctlmd==0 %Matlab espera el trabajo de DigSilent
        for o=1:1200;

    pause(1e-6);
        end
        ctlmd=csvread('D:\Desktop\Prueba\conmu.csv',0,0);
        if ctlmd==1 %DigSilent termino su trabajo
            break
        end
    end
end

% Penalizacion

vmin=0.95;vmax=1.05;
V_tensiones=csvread('D:\Desktop\Prueba\flujos.csv',0,2);
tensiones=V_tensiones';
R=(sum(vmin<tensiones&tensiones<vmax)<9)*1e15;

% Perdidas en las líneas

perdidas_lineas=csvread('D:\Desktop\Prueba\perdidas.csv',0,1);

Pes=sum(perdidas_lineas);

f_obj=Pes

end
```

## Anexo B. Comunicación Matlab – DigSILENT

```
clear all;
clc;

A=csvread('D:\Desktop\Prueba\Datos Cargas.csv'); ); % Se lee el archivo que contiene la
información de las cargas del sistema

csvwrite('D:\Desktop\Prueba\simulacion.csv',A);

csvwrite('D:\Desktop\Prueba\conmu.csv',0); % Se crea un archivo de comunicación
ctlmd=csvread('D:\Desktop\Prueba\conmu.csv'); % Se lee el archivo creado

for nfor=1:200 %Comienza el proceso
    ctlmd=csvread('D:\Desktop\Prueba\conmu.csv');

    while ctlmd==0 %Matlab espera el trabajo de DigSilent
        for o=1:1200;
            % display('Ejecute DigSilent.....');
            pause(1e-6);
        end
        ctlmd=csvread('D:\Desktop\Prueba\conmu.csv',0,0);
        if ctlmd==1 %DigSilent termino su trabajo
            break
        end
    end

    fprintf('Número de iteración = %d\n', nfor);
    if ctlmd==1 % Matlab trabaja y DigSILENT espera

        for a=1:1:33 %si el sistema de distribución cambia se cambia el numero 33 por el número
de barras del nuevo sistema .
            for b=1:1:33
                for c=1:1:33
                    s=[a b c]
                    prrr(nfor)=perdidas_calculadas_con_ayuda_de_PF(s);

                end
            end
        end
    end
end
```

'D:\Desktop\Prueba\Datos Cargas.csv' esto hace referencia a la ubicación donde se guarda el archivo Excel.

Para cada caso de lectura o escritura de un archivo, se debe colocar la ubicación del mismo.



```

Load_20:plini=L20;
Load_21:plini=L21;
Load_22:plini=L22;
Load_23:plini=L23;
Load_24:plini=L24;
Load_25:plini=L25;
Load_26:plini=L26;
Load_27:plini=L27;
Load_28:plini=L28;
Load_29:plini=L29;
Load_30:plini=L30;
Load_31:plini=L31;
Load_32:plini=L32;
Load_33:plini=L33;
fclose(0);

fopen('D:\Desktop\Prueba\flujos.csv','w',0);

ldf = GetCaseObject('ComLdf');
ldf.Execute();

sbarra=AllRelevant('ElmTerm');
for(barra=sbarra.First();barra;barra=sbarra.Next()){
Nbarra=barra:loc_name;
Vb=barra:m:Ul;
Vbpu=barra:m:u;
fprintf(0,'%s,%f,%f',Nbarra,Vb,Vbpu);
}

fclose(0);

fopen('D:\Desktop\Prueba\perdidas.csv','w',1);
slinea=AllRelevant('ElmLne');
for(linea=slinea.First();linea;linea=slinea.Next()){
Nlinea=linea:loc_name;
Per=linea:c:Losses;
fprintf(1,'%s,%f',Nlinea,Per);
}

fclose(1);

fopen('D:\Desktop\Prueba\perdidasbarras.csv','w',2);
slinea=AllRelevant('ElmLne');
for(barra=sbarra.First();barra;barra=sbarra.Next()){
Nubarra=barra:loc_name;
PerB=barra:m:Pout;
fprintf(2,'%s,%f',Nubarra,PerB);
}

fclose(2);
break;
}
}

fopen('D:\Desktop\Prueba\conmu.csv','w',2);
fprintf(2,'%f',1); fclose(2);

```

}