

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
DESPLIEGUE DE MDMS PARA AMI BASADO EN ÁRBOLES DE
EXPANSIÓN USANDO MINIMUM STEINER TREE**

**AUTOR:
LUIS DANIEL GUANOLIQÚIN ALVARO**

**TUTOR:
ESTUARDO JOSAFAT CORREA ZAPATA**

Quito, Febrero 2017

Luis Daniel Guanoliquín Alvaro

**DESPLIEGUE DE MDMS PARA AMI BASADO EN ARBOLES DE
EXPANSION USANDO MINIMUM STEINER TREE**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2017

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña de autores e información de contacto:



Daniel Guanoliquín (Y'1989-M10), nació en Quito, Ecuador. Bachiller con especialidad en Electricidad en el Instituto Tecnológico Superior Central Técnico, Ecuador 2007. Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se enfoca en el estudio de algoritmos matemáticos orientados a la optimización de redes inteligentes para el despliegue de MDMS en AMI.

lguanoliquin@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Estuardo Josafat Correa Zapata, nació en Quito, Ecuador. Obtuvo el título de Ingeniero en Sistemas en la Escuela Politécnica Nacional, Ecuador en 1997. Recibió su grado de Magister en Educación Universitaria en 2010 en la Universidad Tecnológica Indoamericana de Quito, Ecuador. Actualmente se encuentra en la obtención de su título de Dr. en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín – Colombia.

ecorrea@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación de los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2017 Universidad Politécnica Salesiana

Quito-Ecuador

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, Estuardo Josafat Correa Zapata declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *Despliegue de MDMS para AMI Basado en Árboles de Expansión Usando Minimum Steiner Tree* realizado por Luis Daniel Guanoliquín Álvaro, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Febrero 2017



Estuardo Josafat Correa Zapata
Cédula de identidad: 1708183304

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Luis Daniel Guanoliquín Álvaro, con documento de identificación N° 1723359715, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado intitulado: “*Despliegue de MDMS para AMI Basado en Árboles de Expansión Usando Minimum Steiner Tree*”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma



Nombre: Luis Daniel Guanoliquín Álvaro

Cédula: 1723359715

Fecha: Febrero 2017

Índice general

<i>Índice general</i>	V
Resumen	1
Abstract	1
1. Introducción.....	2
2. Despliegue de MDMS en AMI Basado en la Topología de Árboles de Expansión.	4
2.1 Topología de comunicación basada en árboles de expansión para AMI.	4
2.2 Selección del Algoritmo para el Problema de Árboles de Expansión Mínima (MST).	4
2.3 Criterio de solución por el método de Minimum Steiner Tree (SMT).....	5
2.4 Arquitecturas de Comunicación para Despliegue de MDMS en AMI.....	5
2.4.1 Arquitectura de Comunicación Totalmente Distribuida.	6
3. Problema Steiner Mínimo en una Red de Nodos y MDMS Totalmente Distribuidos.	6
3.1. Diseño de la topología de red para el despliegue de MDMS en AMI.	7
3.2. Triangulación de Delaunay para la obtención de puntos de Steiner.....	8
4. Despliegue de una red basada en el modelo topológico de una red compleja.....	9
4.1 Red basada en un algoritmo de nodos y bordes generados aleatoriamente.....	9
4.2 Agrupamiento de Medidores para la ubicación de MDMS.	10
4.3 Despliegue de MDMS en una topología de Árbol.....	10
4.4 Despliegue de MDMS mediante Minimum Steiner Tree.....	11
5. Conclusiones	14
6. Referencias	14
6.1 Matriz de Estado del Arte	19

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Despliegue de MDMS para AMI totalmente distribuidos.....	3
Figura 2. Red formada por Smart Meters, MDMS y Estaciones Base.	7
Figura 3. Implementación factible del SMT.	7
Figura 4. Conjunto de puntos generados P. [Autor]	8
Figura 5. Implementación de los puntos de Steiner S triangulares. [Autor].....	9
Figura 6. Despliegue de medidores inteligentes dentro de una zona geográfica.	9
Figura 7. Ubicación de MDMS dentro de una zona geográfica de medidores.	10
Figura 8. Árbol de Expansión Mínima para una zona geográfica de 8 MDMS.	11
Figura 9. Árbol de Expansión Mínima para una zona geográfica de 11 MDMS.	11
Figura 10. Puntos de Steiner triangulares para una región de 8 MDMS.	12
Figura 11. Puntos de Steiner triangulares para una región de 11 MDMS.	12
Figura 12. Despliegue Mínium Steiner Tree para una región de 8 MDMS.....	13
Figura 13. Despliegue Mínium Steiner Tree para una región de 11 MDMS.....	13
Figura 14. Distancia vs MDMS Árbol de Expansión y Mínium Steiner Tree.....	13
Figura 15. Indicadores del Estado del Arte-Temática.....	22
Figura 16. Indicadores del Estado del Arte-Formulación del problema.....	22
Figura 17. Indicadores del Estado del Arte-Solución	22

DESPLIEGUE DE MDMS PARA AMI BASADO EN ÁRBOLES DE EXPANSIÓN USANDO MINIMUM STEINER TREE

Resumen

En el presente artículo se propone realizar un despliegue óptimo de MDMS para AMI basado en la teoría de árboles de expansión mediante Mínimum Steiner Tree (SMT) para un área geográfica determinada en donde los usuarios están distribuidos aleatoriamente. Para lo cual se busca primero agrupar a cada uno de los usuarios (Medidores) de manera uniforme en clústeres distribuidos a lo largo y ancho del área geográfica. A continuación se procede a emplear un algoritmo de clusterización llamado K-means que se encarga de conglomerar los elementos (Medidores) de la red en K grupos centrales, la distancia de los elementos al centroide más cercano determina el clúster que se forma (MDMS). Se propone una solución al problema de despliegue óptimo de MDMS para redes de comunicación en AMI basado en teoría de grafos, que realice una cobertura de todos los MDMS dentro de AMI a través de una topología de árboles de expansión. Para lo cual se ha empleado el algoritmo de Mínimum Steiner Tree (SMT) que determina la topología de red óptima para la minimización de la distancia de enlace entre MDMS dada como la Función costo-Despliegue de MDMS.

Palabras Clave: Sistema de gestión de medición de datos (MDMS), Infraestructura de medición avanzada (AMI), Despliegue, Problema de Árbol de Steiner Mínimo (SMTP), Rango.

Abstract

This purpose of this article is to perform an optimum deployment of MDMS for AMI, based in the theory of expansion trees through Minimum Steiner Tree (SMT), for a geographic area of network users, randomly distributed. For this purpose, it is firstly needed to group together each one of the users (Meters) in a uniform way in clusters, distributed in length and width of the geographical area. Later, an algorithm of cluster named K-means is used, which is in charge to group the network elements (Meters) in K central groups, the distance of the elements to the nearest centroid determines the cluster that is formed (MDMS). A solution to the MDMS optimum deployment problem for Communication networks in AMI is proposed, based on graph theory, which can make a coverage of all the MDMS inside AMI, through a topology of expansion trees. For this purpose, the Minimum Steiner Tree (SMT) has been used, which determines the topology of optimum network for the link's minimization distance between MDMS, given as the MDMS cost-Development Function.

Keywords: Meter Data Management System (MDMS), Advanced Infrastructure Meter (AMI), deployment, Steiner Minimum Tree Problem (SMTP), Range.

1. Introducción

Despliegue de MDMS en AMI empleando una topología de red basado en arboles de expansión mediante algoritmos matemáticos son la tendencia en la búsqueda de una solución a problemas de optimización en redes, como una respuesta al incremento de la demanda de usuarios en la nueva red eléctrica o como se conoce al Smart Grid [1]. Por tal motivo se busca el empleo de una nueva infraestructura para el despliegue de redes eléctricas inteligentes que abarquen la creciente demanda de usuarios así como la incorporación de tecnologías de comunicación que permitan una conexión bidireccional entre usuarios y distribuidoras para el manejo de nuevos servicios de gestión como procesos de corte y reconexión, así como la recopilación de datos y la facturación del servicio eléctrico [2][3][4]. Se trata de la Advanced Metering Infrastructure (AMI) por sus siglas en inglés, desarrollado como la infraestructura moderna para la red eléctrica inteligente[5]. AMI es el sistema que permite medir, coleccionar y analizar los datos de la energía consumida y de la calidad de la misma por medio de medidores inteligentes (SM) [6][7], además posee la característica de conexión bidireccional entre los consumidores y el proveedor de servicios para el intercambio de información [7][8]. Los datos que se generan por medio de los medidores inteligentes se agrupan por medio de una base de datos dentro de AMI, la base de datos creada comprende un subsistema conocido como (MDMS) Metering Data Management System-Sistema de Gestión de medición datos [9].

El MDMS además de almacenar y analizar datos medidos también se encarga de la integración con los demás sistemas vinculados en la arquitectura de comunicación, como la facturación del cliente (CIS), el sistema de información

Geográfica (GIS), el sistema de Gestión de interrupciones (OMS) y (DMS) que es el sistema para la gestión de Distribución[7]. Una de las arquitecturas de comunicación que se utiliza para el despliegue de MDMS es la Totalmente distribuida, existiendo otras, como la centralizada y la semidistribuida, para su implementación se debe considerar los sistemas que están vinculados a este tipo de arquitectura (OMS, CIS, GIS, DMS) y la frecuencia de muestreo de medición que posee [9][10].

Para el desarrollo del tema que se presenta en este artículo, existen varios estudios que se han analizado previamente, así por ejemplo herramientas analíticas o algoritmos analíticos llamados protocolos de solución, que para este caso viene dado por el árbol de expansión (STP)[11], como búsqueda de una solución en la construcción de una topología óptima con un despliegue lógico, gráficamente representada en un árbol de expansión que busca los caminos de enlaces mínimos y a su vez permita la conexión de todos los nodos del sistema [12]. Una vez obtenido un modelo de red en forma general es decir un árbol de expansión se buscara nuevamente minimizarla en un subconjunto solución llamado el árbol de Steiner mínimo (SMT) para el despliegue de MDMS en AMI[13]. El árbol de Steiner de costo mínimo es una herramienta analítica muy conocida, particularmente utiliza puntos mínimos de Steiner y un borde de longitud limitado, lo cual tiene por objeto encontrar un árbol de conexión de un conjunto de puntos terminales dados, cuya longitud sea mínima[14]. Por lo tanto como una idea, un árbol de Steiner mínimo para un conjunto de n puntos P , se busca un subconjunto S de puntos de Steiner de expansión mínima (SMT) que reduzcan su costo (distancia de despliegue) sobre P [14].

En el despliegue de MDMS se puede emplear distintas arquitecturas de

comunicación, en el caso estudiado se empleará una arquitectura totalmente distribuida por medio de árboles de expansión y se tendrá como idea principal hallar un diseño de red con la distancia más corta que comunique cada uno de los dispositivos de almacenamiento de datos (MDMS) dentro de AMI a un costo mínimo [7].

En el presente documento se tratará de analizar y estudiar un algoritmo que minimice el despliegue de los dispositivos encargados de la gestión de medición de datos (MDMS) dentro de un área geográfica limitada. Una solución para determinar un árbol de expansión óptimo es mediante el algoritmo de Prim el cual toma en cuenta la distancia euclidiana para la conexión de un vértice (nodo) inicial al que se van agregando nuevos vértices de conexión donde la distancia entre cada vértice es mínima[15], en la construcción del árbol mínimo se considera la arista de menor peso que une el vértice inicial con el vértice más cercano en el grafo del árbol inicial[16]. En la Figura 1, se muestra una Arquitectura de Comunicación Totalmente Distribuida en AMI.

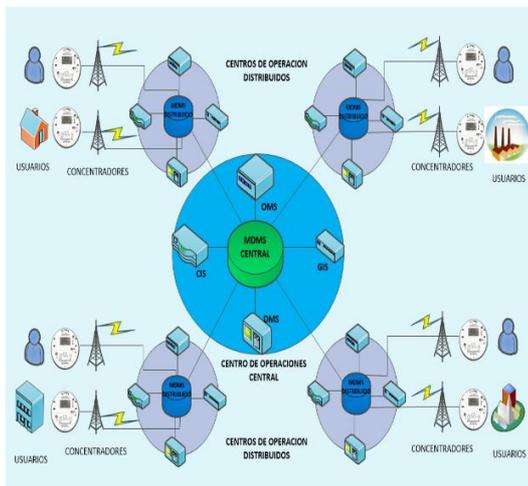


Figura 1. Despliegue de MDMS para AMI totalmente distribuidos.

AMI se ocupa de la recolección de los datos tomados por los Medidores Inteligentes para luego transportarlos hacia los sistemas de gestión de

Medición de datos (MDMS) que se encargara de distribuir la información a cada uno de los sub-sistemas (OMS, CIS, GIS, DMS), clasificándola de manera óptima para los servicios de operación y gestión [17][18]. En el Smart Grid se considera a las arquitecturas de comunicación como un elemento importante para la medición, recolección y procesamiento de datos, por otro lado también se toma en cuenta la factibilidad y escalabilidad que posee [9][19]. Dicha arquitectura comprende dispositivos de medición (Smart Meter), redes de telecomunicación para diferentes áreas geográficas de cobertura como LAN, NAN, MAN, WAM, etc., sistemas de gestión de medición de datos (MDMS), y equipos de operación que ayuden a la incorporación de los datos almacenados dentro de las interfaces de comunicación y los servicios de gestión [20][3]. El consumidor cuenta con un dispositivo electrónico de estado compacto (Smart Meter) que cumple la función de recoger los datos que se generan en tiempo real. Estos dispositivos llamados medidores inteligentes transmiten los datos recopilados en el punto de consumo, por medio de redes fijas comunes, como un ejemplo la red de banda ancha por línea eléctrica convencional [2][21]. En este caso específico se tendrán varios Smart meter localizados en una región geográfica a los cuales se tratarán de organizar en conjuntos que contengan un centroide el cual fungirá como un sistema de gestión de medición o recolector de datos (MDMS). Si se toma en cuenta que este mismo proceso se lo realiza para varias zonas geográficas se tendrá como resultado varios centroides a los cuales se puede aplicar el criterio de *Mínimum Steiner Tree* para optimizar el despliegue de los MDMS.

El resto del trabajo se organiza de la siguiente manera. En la sección 2 se analiza los subtemas relacionados al trabajo principal. El planteamiento del

problema y el diseño de posibles soluciones se describen en la Sección 3. Los detalles relacionados con el método resolutivo mediante Minimum Steiner Tree y el análisis de resultados se proporcionan en la Sección 4, el trabajo se concluye finalmente en la Sección 5.

2. Despliegue de MDMS en AMI Basado en la Topología de Árboles de Expansión.

El objetivo del trabajo busca el despliegue óptimo de MDMS dentro de AMI, para ello es necesario considerar el modelo de una arquitectura de comunicación adecuada a las necesidades de la red, donde se garantice una interacción segura de cada uno de los dispositivos y equipos en los diferentes niveles de gestión[22], además la capacidad de manejo de la gran cantidad de datos que vayan generando la medición de todos los usuarios de la red, considerando la capacidad de expansión que pueda tener en el futuro [7]. Una arquitectura de comunicación dentro de Smart Grid conlleva una estructura compleja para cumplir los objetivos de estabilidad y buena comunicación entre los dispositivos que la conforman [22][23], por lo cual el análisis de un modelo apropiado que cubra los requerimientos demandados por la red, se debe llevar a cabo, con la finalidad de garantizar la operatividad en los diferentes niveles de gestión de AMI dentro del Smart Grid[5][24].

2.1 Topología de comunicación basada en árboles de expansión para AMI.

Un árbol de expansión viene dado como una topología de árbol libre de bucles, en un enfoque físico busca el camino más corto de enlace entre los nodos existentes garantizando la comunicación entre todos. También se considera como una forma gráfica de una sola dirección ponderada, es decir que la suma de sus pesos determina el subgrafo de sí mismo

como el árbol de expansión de mínima solución[15].

La solución de encontrar una topología radial para el despliegue de MDMS en AMI con un mínimo de pérdidas puede ser interpretada como encontrar un árbol de expansión en la red que también genera pérdidas mínimas [1].

Una característica propia de un MST (Minimum Spanning Tree) es que de los bordes que atraviesan el vértice, el borde con el peso más pequeño, debe pertenecer al MST. Cuando el peso relacionado a cada borde representa la longitud entre dos puntos, uno de los bordes del conjunto del MST es la distancia más corta entre dos subárboles que están enlazados por ese borde[1][25].

2.2 Selección del Algoritmo para el Problema de Árboles de Expansión Mínima (MST).

En la actualidad existen varios algoritmos para determinar un árbol de expansión en base a una gráfica previamente dada. Entre los algoritmos más conocidos están Prim y Kruskal que pueden determinar el árbol de expansión mínima de manera exitosa por medio de un grafo dado[15][12]. En este trabajo se ha propuesto el empleo del algoritmo de Prim, el cual se encarga de buscar un árbol de peso mínimo entre los nodos (vértices) de una red, es decir busca un subconjunto de bordes de conexión de un Grafo inicial que unan todos los vértices mediante un árbol de expansión mínimo[15].

La construcción del árbol de expansión mínimo selecciona al azar un nodo (vértice) como un árbol inicial, luego adiciona inmediatamente el borde próximo más corto que une un nuevo vértice, hasta unir todos los vértices al árbol inicial.

La estructura del algoritmo de Prim para un grafo no dirigido $G (V, E)$ de V vértices y E bordes sigue los pasos siguientes [1]:

1. Escoger cualquier vértice r en V para ser el nodo raíz. Establecer un conjunto $V_t = \{r\}$ y $E_t = \emptyset$.
2. Encuentre un borde con el peso más pequeño tal que uno de sus puntos finales este en S y el otro este en V/V_t . Adicionar este borde a E_t y su nuevo vértice a S .
3. Si $V/V_t = \emptyset$, entonces concluir búsqueda. Caso contrario repita el paso 2.

Dentro de los algoritmos de agrupamiento basados en MST se considera un conjunto de n puntos de datos y la distancia medida entre ellos, esta información casi siempre está dada y es el primer paso en la construcción de un MST [25][26].

De manera general se puede considerar que para n puntos o nodos se pueden determinar un número de bordes que conectan a todos los puntos entre sí, estos bordes pueden ser calculados mediante la siguiente formula:

$$n(n-1)/2 \quad (1)$$

Donde:

n : Numero de nodos

Para un par de puntos dados en el conjunto de datos se relacionan a un borde, sin embargo solo $n-1$ de los cuales se conservan en un MST [25][27]. El tiempo de los algoritmos tradicionales para MST es otra de las variantes que se han conseguido minimizar con la ayuda de un algoritmo de agrupamiento como el algoritmo de Prim el cual tiene un tiempo de ejecución de $O(E \log V)$ [11]. Continuando en la búsqueda de una solución para el MST por medio de algoritmos de agrupamientos se puede establecer una medida de borde inconsistente con el simple hecho de dividir el árbol en grupos[28][12]. Un borde inconsistente se define como los bordes cuyos pesos son mayores que el peso promedio de los bordes cercanos al árbol [25].

2.3 Criterio de solución por el método de Minimum Steiner Tree (SMT).

Se tiene un conjunto P de n puntos de donde necesitamos obtener un conjunto S denominados puntos de Steiner de tal manera que el costo del árbol de expansión mínima (MST) sobre P con relación a S sea mínima [14]. La solución referida para este caso es el llamado método de Minimum Steiner Tree para un conjunto P de n puntos representado SMT (P) [14][28].

Si se considera un plano real, se está hablando de un plano euclidiano, en el cual se puede encontrar el árbol de Steiner de n puntos, sin embargo para poder encontrar el Minimum Steiner Tree en dicho plano es necesario introducir puntos adicionales llamados puntos de Steiner que conecten cada borde entre sí [29][30]. En un árbol T el costo de borde viene dado como la distancia que existe entre sus puntos extremos. El costo total del árbol T , será la suma del costo de todos sus bordes [14][31].

La distancia existente entre dos puntos (x_1, y_1) y (x_2, y_2) está determinado por la siguiente expresión para el plano euclidiano.

$$dist((x_1, y_1), (x_2, y_2))^2 = |x_1 - x_2|^2 + |y_1 - y_2|^2 \quad (2)$$

Donde:

x_1, y_1 : Coordenadas punto extremo inicial

x_2, y_2 : Coordenadas punto extremo final

Tomado de: [14] Gabriel Robins, Alexander Zelikovsky, Minimum Steiner Tree construction, 2008, p. 2.

2.4 Arquitecturas de Comunicación para Despliegue de MDMS en AMI.

El estudio de una arquitectura de comunicación evaluada en términos de escalabilidad y el procesamiento de datos debe ser direccionado al incremento de usuarios y de demanda, teniendo como objetivo el minimizar el costo de expansión de la red al incrementarse la demanda. De esta manera la arquitectura

se considera un elemento importante en AMI, para el despliegue óptimo de MDMS que ayude a mantener la integración de la red en términos de comunicación y procesamiento de la información en los diferentes niveles de infraestructura [7]. Por tanto se ha optado por la Arquitectura de Comunicación Totalmente distribuida que abarca las demás arquitecturas existentes como la centralizada y semidistribuida con el fin de emplear un modelo de arquitectura que contenga los escenarios posibles para el despliegue de MDMS.

2.4.1 Arquitectura de Comunicación Totalmente Distribuida.

Para una arquitectura de comunicación totalmente distribuida se tiene en cuenta el despliegue de cada MDMS con un servicio de operación y gestión correspondiente[7]. En una arquitectura de comunicación totalmente distribuida el costo de comunicación entre un centro de operación y los MDMS asociados a cada uno puede ser reducido debido a que se encuentran físicamente juntos [9][7]. Con respecto al ancho de banda de comunicación necesario para el intercambio de información entre cada MDMS distribuido y el servidor central, puede ser considerado como un valor constante ya que no se ve afectado ni por el número de medidores ni por la frecuencia de muestreo de los mismos [2][7][9].

Los parámetros que se asumen intervienen en la formulación del costo de despliegue de MDMS distribuidos está dado por:

λ_i : Tasa de transmisión promedio de datos de cada concentrador i en

$$Mbps\left(\frac{\text{megabits}}{\text{seg}}\right)$$

d_{ij} : Distancia de un concentrador i a un MDMS j en kilómetros Km

C_j : Distancia de un MDMS j a un centro de Operaciones o entre MDMS

β : Unidad de costo del ancho de banda – producto distancia ($Mbps \times Km$)

Y_j : Ubicación candidata j escogida para el despliegue de MDMS

f_j : Costo despliegue de un MDMS en la ubicación j

M : Numero total de ubicaciones de MDMS

$$\text{costoTot}(T) = \sum_{j=1}^M \beta \cdot Y_j \cdot C_j + \sum_{j=1}^M f_j \cdot Y_j \quad (3)$$

Tomado de: [7] Jiazhen Zhou, Rose Qingyang Hu, Yi Qian, Scalable Distributed Communication Architectures To Support Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid, 2012, p. 6.

3. Problema Steiner Mínimo en una Red de Nodos y MDMS Totalmente Distribuidos.

El SMT tiene su origen en el Problema de Árbol de Steiner nombrado en honor al matemático Jacob Steiner[32], que consiste en encontrar una alternativa de conexiones factibles entre tres puntos en el plano euclidiano, tal que la suma de sus conexiones posibles sean mínimas [33], por lo que la mejor forma de encontrar dichas trayectorias se obtienen agregando un cuarto punto a través del cual se conectaran el grupo de 3 [34][35].

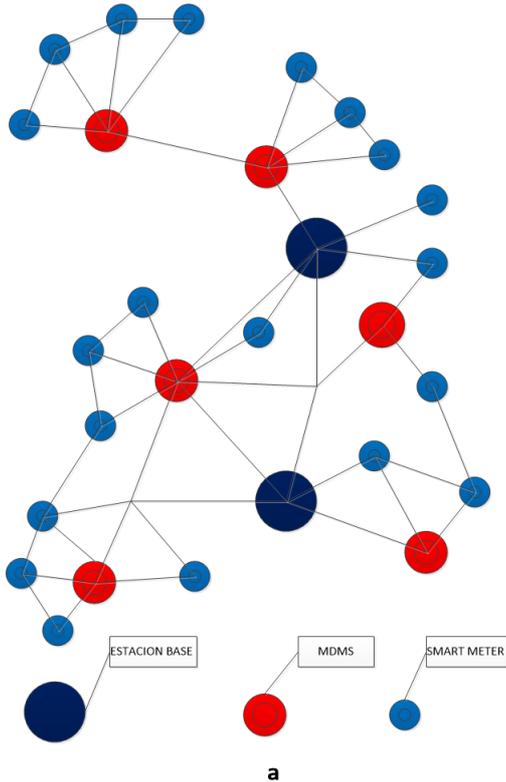


Figura 2. Red formada por Smart Meters, MDMS y Estaciones Base.

Tomado de: [32] Álvarez, Eduardo A, Universidad de Talca Facultad de Ingeniería PRIZE COLLECTING STEINER TREE CON DATOS, 2010, p. 4.

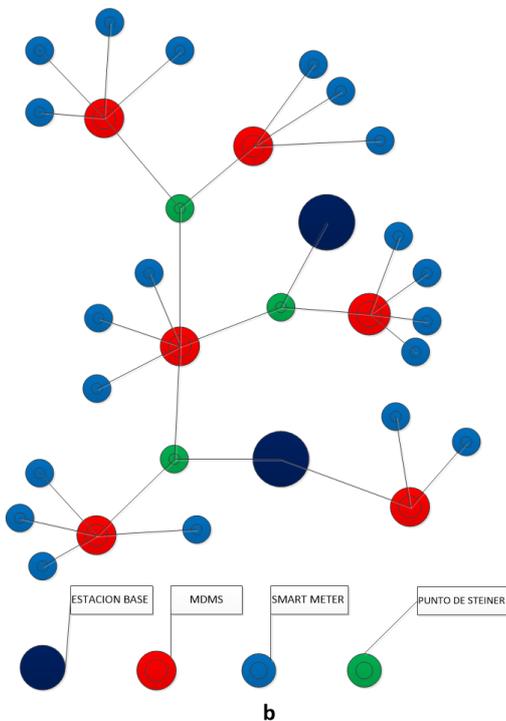


Figura 3. Implementación factible del SMT.

Tomado de: [32] Álvarez, Eduardo A, Universidad de Talca Facultad de Ingeniería PRIZE COLLECTING STEINER TREE CON DATOS, 2010, p. 4.

Como se muestra en la Figura 2 de la red compuesta de nodos de color celeste (Smart Meters), nodos de color rojo como MDMS (Gestores de Datos) y nodos de color azul (Estaciones Base), se tiene un arreglo de conexiones posibles tal que el costo de construcción de las líneas sea mínimo. En la Figura 3 se muestra una solución factible del SMT, como se puede ver el árbol cubre todos los MDMS por medio de los nodos de color verde creados, a estos nodos nuevos se los conoce como nodos de Steiner[32][36]. Se representa como $G = (V, E)$, donde V y E son el conjunto de nodos y bordes, y un conjunto $\bar{V} \subseteq V$, que se denominan nodos terminales. El objetivo del SMT es encontrar un árbol $T = (V(T), E(T))$ de $G, V(T) \subseteq V, E(T) \subseteq E$ que cubra todos los nodos en $\bar{V}, \bar{V} \subseteq V(T)$, y minimice la función de costo de despliegue de la red [32][34].

$$f(T) = \sum_{e \in E(T)} c_e \quad (4)$$

Donde:

c_e Es un valor real positivo asociado a cada $e \in E$.

Tomado de: [32] Álvarez, Eduardo A, Universidad de Talca Facultad de Ingeniería PRIZE COLLECTING STEINER TREE CON DATOS, 2010, p. 4.

3.1. Diseño de la topología de red para el despliegue de MDMS en AMI.

Como una solución propuesta al despliegue de MDMS se ha hecho relación a un estudio físico topológico, en donde se hace uso de la teoría de campos en la estructura de una red topológica para encontrar la relación entre los nodos y los bordes de enlace que los atraviesan por medio de una característica de distribución subyacente[37][38]. Por lo tanto, dado una red $G = (V, E)$, donde V es el conjunto de nodos y E es el conjunto de

bordes de enlace. La ubicación de cada nodo en la red, se considera como un punto de partida en la iteración de todos los nodos, formando un campo topológico sobre la red [39]. El estudio para determinar los nodos más relevantes en la red mediante un campo potencial topológico, es un tema que ya se ha tratado en diferentes estudios y lo puede analizar con más detenimiento en el paper “Evaluate Nodes Importance in the Network using Data Field Theory” de HE Han, GAN Wen-yan, LI De-yi en [39] aquí se considera un factor de influencia σ el cual determina la región de influencia de cada nodo y la importancia en la red. El objetivo que se busca es que cada nodo en la red pueda ser representado de manera física como una partícula material la cual crea un campo potencial alrededor de sí misma en conjunto con los demás nodos se forma un campo potencial sobre la red [40][41].

3.2. Triangulación de Delaunay para la obtención de puntos de Steiner.

Sea P un subconjunto de nodos generados dentro de la red de nodos $G = (V, E)$, entonces $P = (V(P), E(P))$ se considera como el *mínimum Steiner Tree (SMT)*, donde $V(P) \subseteq V$ y $E(P) \subseteq E$ [42].

Para la obtención de los puntos de Steiner, existen dos propiedades que lo demuestran, tal como lo hace referencia en “Two New Efficient Approximation Algorithms with $O(k \log k)$ for the Steiner Tree Problem in Rectilinear Graphs” de Tadashi Matsumoto, Tomohiro Takahata, y Kohkichi Tsuji en [30]:

Propiedad 1

Todos los puntos de Steiner deben tener ya sea un grado 3 o 4.

Propiedad 2

El número máximo de puntos de Steiner en P es $k-2$, donde k viene dado como

los puntos de partida (MDMS) para la triangulación de Delaunay.

Para la solución óptima del árbol de Steiner, se aplica la teoría de triangulación de Delaunay para la generación de los puntos de Steiner, la triangulación de Delaunay se encarga de maximizar el ángulo mínimo de todos los triángulos de la red de Delaunay cuyos vértices son los puntos de generación dados como MDMS [43]. Por lo tanto la red de Delaunay está formada por el conjunto de triángulos, donde sus vértices son los puntos de generación obtenidos para los MDMS [23], como se muestra en la Figura 4.

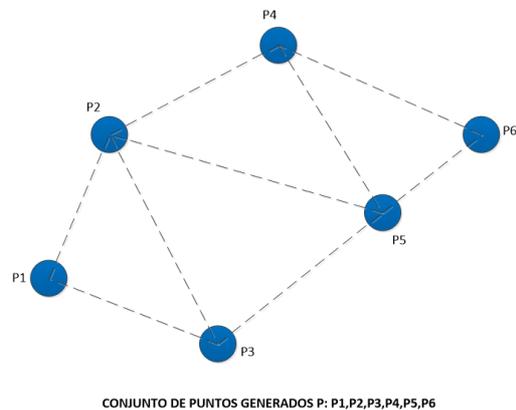


Figura 4. Conjunto de puntos generados P. [Autor]

Considerando que el número de vértices de un triángulo es tres y de igual manera sus lados que lo conforman, vienen dados como los bordes de la red de Delaunay, por lo tanto se puede aplicar la propiedad de los 3-puntos del árbol de Steiner óptimo en cada triángulo de la red de Delaunay [23].

El árbol de Steiner óptimo formado con tres puntos de generación tiene al menos un punto de Steiner en el gráfico de la red.

El punto de Steiner triangular se define como un punto de la red del árbol de Steiner óptimo, el cual se obtiene por medio de los puntos generados (MDMS), es decir por los tres vértices de cada triángulo en la red de Delaunay.

Se considera el triángulo con los tres puntos

$P_i(X_i, Y_i)$, $P_j(X_j, Y_j)$, y $P_k(X_k, Y_k)$, donde $X_j < X_i < X_k$ y $Y_i < Y_k < Y_j$.

Por lo tanto el punto de Steiner Triangular está dado por $P_s(X_i, Y_k)$ [23]. A continuación en la Figura 5, se detalla el árbol de Steiner óptimo implementando puntos de Steiner Triangulares.

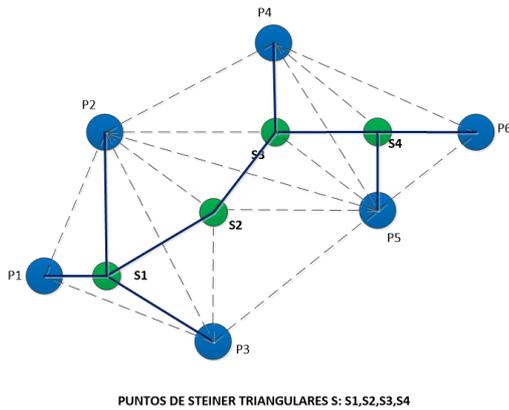


Figura 5. Implementación de los puntos de Steiner S triangulares. [Autor]

4. Despliegue de una red basada en el modelo topológico de una red compleja.

La característica base para una red compleja, está dado como una estructura formada de nodos y bordes que constituyen tanto los elementos como el medio de interacción dentro del área referenciada[41].

El modelo de una red con V nodos y E bordes se describe de la siguiente forma:

$$G = (V, E)$$

Donde:

V : Conjunto de nodos de la red

E : Conjunto de bordes de la red

Por lo tanto:

$$V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$$

V : es la colección de todos los nodos

$$E = \{e_1, e_2, e_3, \dots, e_m\}$$

E : es la colección de todos los bordes

$$e_k = \{v_i, v_j\}$$

De modo que e_k representa el borde entre el nodo i y el nodo j.

4.1 Red basada en un algoritmo de nodos y bordes generados aleatoriamente.

Algoritmo generación de una red con nodos aleatorios (GAN).

Paso1: INICIO-Establecer zona geográfica delimitada

Paso2: Número de nodos o medidores para una zona geográfica.

Paso3: Longitud y Latitud de Grilla

Paso4: Proceso, Generación de un lazo for

For i=1: V: E

Rand (state, i)=m; generación randomica de nodos

Lonlim= [1 250]; almacenamiento de muestras en X

Latlim= [1 250]; almacenamiento de muestras en Y

End for

Paso5: Visualización, Resultado

Creación de una red de nodos dentro de una zona geográfica delimitada.

Paso6: FIN.

A continuación en la Figura 6, se presenta un modelo de red $G = (V, E)$, desplegada por GAN en una zona geográfica.

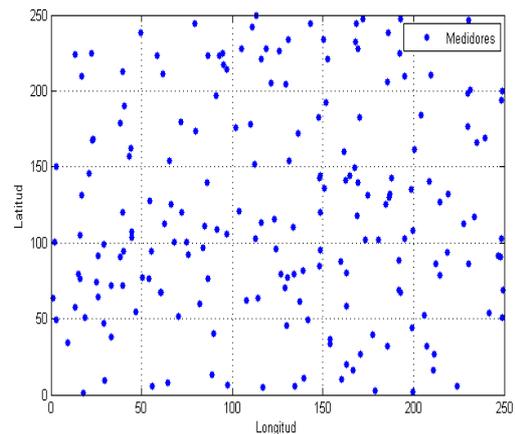


Figura 6. Despliegue de medidores inteligentes dentro de una zona geográfica.

Mediante el algoritmo de GAN, se ha corrido una simulación, donde se puede visualizar el despliegue aleatorio de los nodos (Medidores Inteligentes) dentro un área geográfica delimitada que

representan la ubicación de los usuarios en la red y posteriormente se agruparan en forma de clústeres a los sistemas de gestión de medición de datos (MDMS) más cercanos.

4.2 Agrupamiento de Medidores para la ubicación de MDMS.

Una vez obtenido el despliegue de una red nodos en una zona geográfica se hace uso de un algoritmo de clusterización denominado K-means, para determinar las posiciones iniciales en las cuales se ubicaran los Sistema de Gestión de medición de datos (MDMS) para luego realizar el despliegue más óptimo dentro de un área geográfica dada, para este ejemplo se lo hará en una zona geográfica delimitada.

El algoritmo de K-means se basa en el agrupamiento de vectores en función de una métrica comparativa llamada como Distancias Euclidianas[15][44]. A este análisis dado en base a una medida de similitud, lo conocen también como Optimización de distancias entre cada uno de los nodos (Medidores inteligentes) dentro del área establecida y los gestores de información (MDMS). La estructura del algoritmo en su forma de pseudocódigo esta dado como sigue:

Algoritmo de clusterización k-means

Paso1: INICIO-Toma muestra de medidores desplegados dentro de una zona geográfica.

Paso2: Establecer distancia de cobertura y número de usuarios por clústeres.

Paso3: Hacer clusterización de muestra mediante K-means por número de usuarios.

Paso4: Proceso, Establecer centroides de clústeres.

While n, $m \leq 1$: K (clústeres, centroides) \leq umbral

- a. For $i \leq n$ casos
 - Asignar caso de conglomerado más cercano por distancia euclidiana mínima.
 - b. Recalcular centroides.
- End For
- End While

Paso5: Visualización, Desplegar clústeres para el número de medidores mediante K-means.

Paso6: FIN.

A continuación en la Figura 7, se muestra una primera prueba de la simulación del algoritmo en una zona geográfica delimitada para la ubicación de los Sistemas de Gestión de medición de datos (MDMS) y sus respectivos grupos de nodos (Medidores).

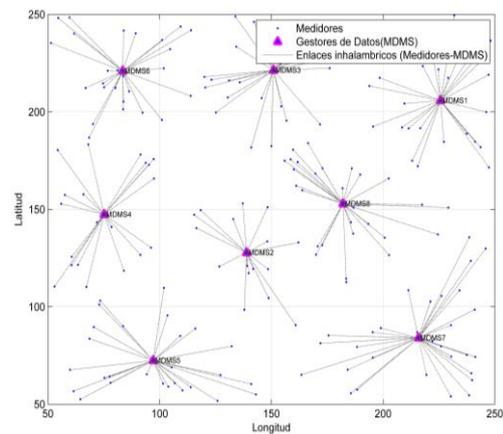


Figura 7. Ubicación de MDMS dentro de una zona geográfica de medidores.

Algunos parámetros a tener en cuenta para el agrupamiento de Medidores Inteligentes con los Sistemas de Gestión de medición de datos (MDMS) es las características del diseño de capacidad de procesamiento de información que posee cada MDMS, además el rango de cobertura y la distancia máxima que debe existir desde un medidor hacia cada MDMS[17].

Los medidores inteligentes se van agrupando de forma gradual al centroide más cercano de cada uno de los clústeres donde se ubicaran los Sistemas de Gestión de medición de datos (MDMS) de manera distribuida.

4.3 Despliegue de MDMS en una topología de Árbol.

Una vez obtenido las posiciones de los MDMS para una región de usuarios por medio del algoritmo de clusterización K-means, se procede a implementar el

algoritmo de Prim para calcular una topología de árbol de bordes mínimos que conecten los MDMS. De donde se despliegue las trayectorias posibles de enlace, como una búsqueda del camino más corto de comunicación en una topología de árbol de expansión mínima en el plano euclidiano[26][45].

Algoritmo de Prim

Paso1: INICIO-Toma posición centroides clústeres desplegados en el área.

Paso2: Establecer distancia entre centroides de clústeres con el borde de menor costo.

Paso3: Desplegar Árbol de expansión para enlaces posibles de vértices por ubicación de MDMS.

Paso4: Proceso, While Clúster i, j (clústeres, centroides) \leq umbral

Enlazar clústeres o centroides

Establecer enlaces C_i, j posibles de vértices.

a. Si W_{ij} es el menor de los pesos de los enlaces posibles

b. For $i \leq n$ casos

Hacer: Árbol de enlace C_i, j más cercano por Prim con W_{ij} mucho menor.

c. Recalcular trayectoria árbol de expansión mínima

End If

End For

End While

Paso5: Visualización, Desplegar árbol de expansión mínima para la muestra de MDMS mediante Prim.

Paso6: FIN.

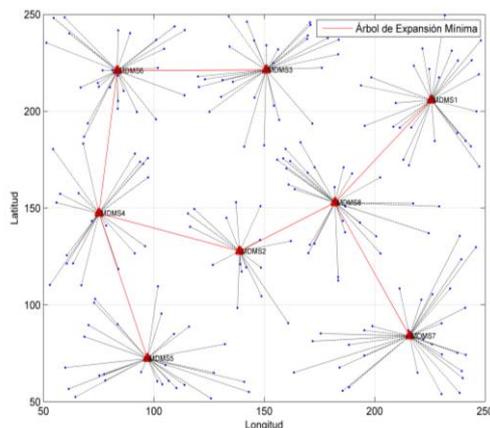


Figura 8. Árbol de Expansión Mínima para una zona geográfica de 8 MDMS.

Como una instancia previa al despliegue del **Mínimum Steiner Tree** se tiene el

árbol de expansión Mínima (MST) tal como se muestra en la figura 8, para el conjunto de MDMS se busca el camino de enlace más corto determinado a partir de los bordes que atraviesen dichos nodos o vértices, donde el borde con el peso mínimo es decir la longitud mínima que une a un par de nodos debe pertenecer al árbol MST[46].

A continuación se realiza otra prueba de simulación para una muestra de 500 medidores los cuales estarán agrupados en clústeres de 50, donde K-means ha arrojado un número de 11 clústeres para la ubicación de los MDMS. Para luego ser desplegados en un área geográfica y proceder a trazar la trayectoria de enlace más óptima en una topología de árbol de expansión Mínima mediante Prim.

Esto se lo puede visualizar en la Figura 9.

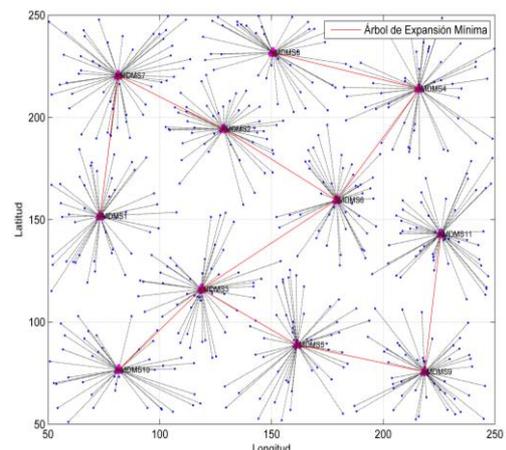


Figura 9. Árbol de Expansión Mínima para una zona geográfica de 11 MDMS.

4.4 Despliegue de MDMS mediante **Mínimum Steiner Tree.**

Ahora que se ha obtenido el árbol de expansión mínima en el plano euclidiano se procede a optimizar el despliegue de MDMS por medio del árbol Mínimo de Steiner basado en la triangulación de Delaunay, como un subconjunto del árbol de expansión mínima se emplea la Teoría de Triangulación de Delaunay de un conjunto de puntos para obtener la red de Delaunay que permita establecer los sitios candidatos posibles para la introducción de los puntos de Steiner

triangulares [43]. Los puntos para la Triangulación de Delaunay se obtienen como los centros de masa para los grupos de usuarios calculados por el algoritmo de K-means [43].

Aquí se describe la idea principal del algoritmo para el despliegue de MDMS. El objetivo principal es obtener el Mínimum Steiner Tree para la red $G=(V, E)$ de MDMS por medio de la introducción de puntos adicionales en la red llamados puntos de Steiner V' , para lo cual se hace empleo de Triangulación de Delaunay donde cada punto o vértice V_{ij} que conforma dicho triángulo estará dado como el MDMS en la red.

Siguiendo la teoría de Delaunay se traza la región entre el grupo de 3 MDMS para posteriormente introducir el punto de Steiner V' a partir de la propiedad de los 3-puntos para el árbol de Steiner óptimo en cada triángulo de Delaunay [23], donde finalmente se enlaza cada grupo de MDMS con un punto de Steiner eliminando el borde E con mayor peso en la red. Por lo tanto el árbol mínimo de Steiner es el árbol obtenido del subconjunto de puntos creados de la triangulación de Delaunay de un conjunto de puntos[43].

Algoritmo por Mínimum Steiner Tree para Árbol de Expansión mínima

Paso1: INICIO-Topología de Árbol de Expansión Mínima con posiciones posibles para despliegue de MDMS

Paso2: Distancia de borde mínimo por Mínimum Steiner Tree para Despliegue de MDMS

Paso3: Establecer grupos de triples $T=(V1, V2, V3)$ entre centroides de clústeres para la región de usuarios.

Paso4: Proceso, For: Para cada V_i y V_j de T (grupos de triples)

Hacer: Enlace por Triangulación de Delaunay (centros, clústeres) $e_{ij}=(v1, v2, v3)$.

Si el enlace e_{ij} de $T=(V1, V2, V3)$ es trazado Entonces

Adicionar punto de Steiner V' dentro del área dada por Delaunay del grupo de triples T .

Paso4.1: For: Para todo $V_{ij}, V' \in T$

Si C_{ij} , es el menor de los enlaces posibles Entonces

Hacer: Árbol T de enlace C_{ij} con E_{ij} más corto por Mínimum Steiner Tree con nodos adicionales de Steiner posibles.

End Si

End Si

End For

End For

Paso5: Visualización, Desplegar árbol de Steiner mínimo para MDMS Calculados.

Paso6: FIN.

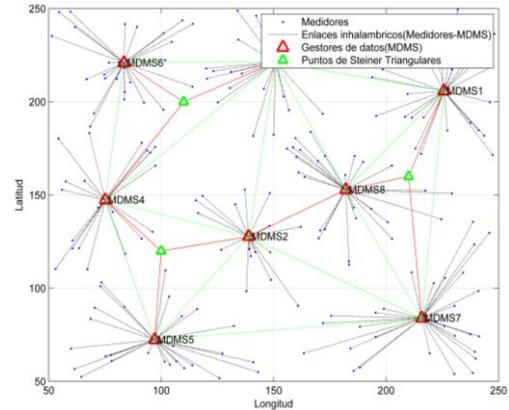


Figura 10. Puntos de Steiner triangulares para una región de 8 MDMS.

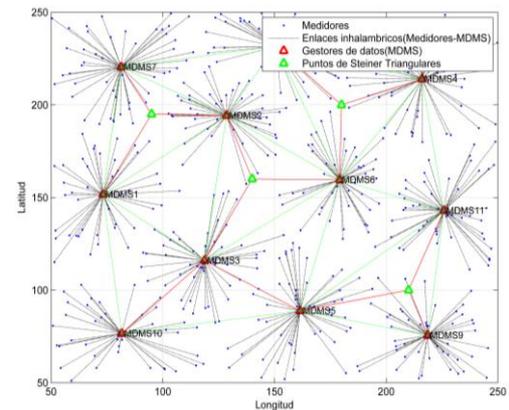


Figura 11. Puntos de Steiner triangulares para una región de 11 MDMS.

Como se puede apreciar en las Figuras 10 y 11 mostradas, se hace uso de la teoría de la triangulación de Delaunay para la región de MDMS desplegados a partir de una muestra de 200 y 500 medidores, donde se buscara trazar en grupos de 3 nodos (MDMS) regiones triangulares para la red de Delaunay que contenga las posiciones candidatas posibles para la introducción de los puntos adicionales de Steiner del árbol de expansión mínima. Una vez obtenida

las regiones candidatas, se aplica la teoría de los 3-puntos del árbol de Steiner óptimo para cada región triangular de la red de Delaunay [23]. Por lo tanto el punto de Steiner Triangular $P_s(X_i, Y_k)$ se obtiene a partir de los nodos generados V_{ij} por el método de K-means que conforman los tres vértices de cada triángulo

$P_i(X_i, Y_i)$, $P_j(X_j, Y_j)$, y $P_k(X_k, Y_k)$ en la red de Delaunay, como el circuncentro de cada triángulo que conecte el grupo de 3 MDMS.

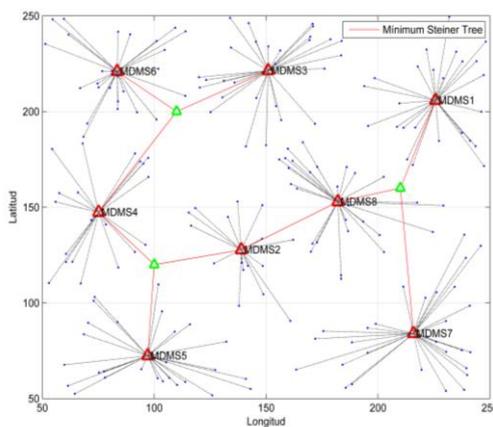


Figura 12. Despliegue Mínium Steiner Tree para una región de 8 MDMS.

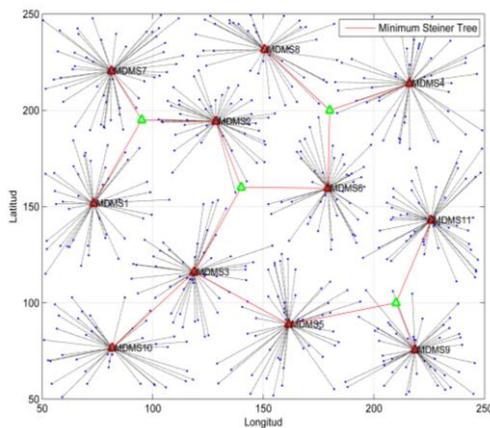


Figura 13. Despliegue Mínium Steiner Tree para una región de 11 MDMS.

En las Figuras 12 y 13 mostradas se busca obtener la solución óptima al problema en un grafo $G=(V,E)$ que representa la topología de red de MDMS basado en un árbol de expansión mínima empleando la teoría de triangulación de Delaunay para la introducción de puntos

adicionales de Steiner V' en la red G que permita minimizar la distancia de enlace entre los MDMS V_i y V_j según el peso de borde E que corresponda como el costo mínimo de despliegue, donde cada punto de Steiner V' adicional está representado por un triángulo en la red que constituyen los vértices del nuevo árbol de expansión mínima, el cual representa la búsqueda final del problema dado como el Mínium Steiner Tree que minimiza el despliegue de MDMS.

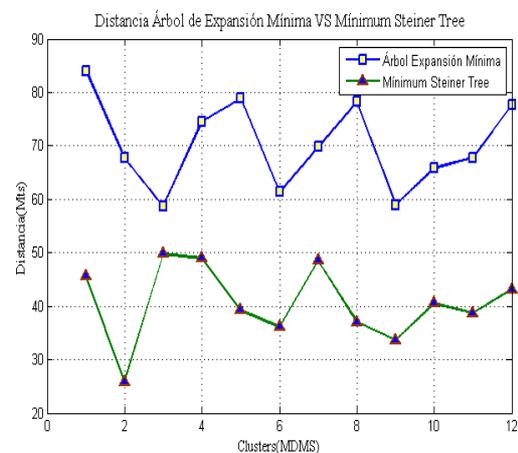


Figura 14. Distancia vs MDMS Árbol de Expansión y Mínium Steiner Tree.

Los resultados que se muestran en la figura 14, indican un mejor rendimiento que ofrece el algoritmo de Mínium Steiner Tree en comparativa con el Árbol de Expansión Mínima, se han hecho pruebas para una muestra de 500 medidores el cual abarca un escenario más representativo para un mejor rendimiento del algoritmo de Mínium Steiner Tree, donde se observa que la distancia desplegada por cada uno de los algoritmos para el numero de MDMS es diferente. En una comparativa Mínium Steiner Tree arroja mejores resultados a lo que optimización de distancia se refiere, buscando el borde de peso mínimo que reduzca la distancia de enlace entre los MDMS dada como la función de costo-despliegue. De esta manera se puede concluir que la

distancia se ve reducida al emplear el algoritmo de Minimum Steiner Tree.

5. Conclusiones

La implementación de algoritmos basado en la teoría de grafos es una herramienta computacional muy útil en la búsqueda de soluciones a problemas de optimización de redes, por tanto el Minimum Steiner Tree permite encontrar una topología de árbol de expansión T, que cubra todos los nodos V en la red G, minimizando la distancia de enlace entre los nodos de la red denominado como el costo de despliegue.

El Minimum Steiner Tree permite determinar el árbol de expansión mínima de una red de nodos ponderada, por medio de una topología de árbol como la ruta de enlace entre los nodos. Se concluye que el Minimum Steiner Tree es una solución a la búsqueda de un árbol con el peso mínimo a partir de los llamados puntos de Steiner para lograr minimizar las distancias.

Mediante el empleo de la Triangulación de Delaunay se ha podido obtener el Minimum Steiner Tree a partir de los nodos originales V_{ij} del árbol de Expansión Mínima, creando puntos intermedios mediante triangulaciones con el único objetivo de minimizar las distancias. Se han tomado como ejemplos para la simulación muestras de 200 y 500 nodos, los cuales se encuentran distribuidos aleatoriamente dentro de un área geográfica de una longitud y latitud dadas.

A este conjunto de nodos se los agrupa en n clústeres, considerando la capacidad y la distancia mínima de tal forma que un nodo (Medidor) solo puede pertenecer a un determinado clúster.

El estudio realizado permite concluir que si se considera a cada nodo como un medidor inteligente, la cantidad de datos

que se generará va a ser ostensiblemente alta y si además se considera la bidireccionalidad del flujo de información en intervalos de 15 minutos la red podría saturarse, en este caso el despliegue de los MDMS debería considerar el tratamiento de Big data.

Se puede concluir de manera general que al realizar la simulación y el análisis de los resultados obtenidos, con los algoritmos de Minimum Steiner Tree y Árboles de Expansión mínima, la distancia total simulada con SMT es menor a la distancia total simulada con MST, debido a la implementación de puntos de Steiner en el Árbol de expansión mínima.

6. Referencias

- [1] H. Ahmadi and J. R. Martí, "Minimum-loss network reconfiguration: A minimum spanning tree problem," *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 1, pp. 1–9, 2015.
- [2] R. Rashed Mohassel, A. Fung, F. Mohammadi, and K. Raahemifar, "A survey on Advanced Metering Infrastructure," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 63, pp. 473–484, 2014.
- [3] Z. Li, F. Yang, S. Mohagheghi, Z. Wang, J. C. Tournier, and Y. Wang, "Toward smart distribution management by integrating advanced metering infrastructure," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 105, pp. 51–56, 2013.
- [4] R. E. D. D. E. Medición, A. Ami, and C. Tvcable, "Red de medición avanzada (ami) circuito tv cable, suba," 2013.
- [5] D. Torres Riascos, E. Inga Ortega, and A. Aguila Tellez, "Advanced metering infrastructure for

- microgeneration in rural zones using TV white spaces based on spectrum opportunistic,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 12, pp. 3813–3819, 2015.
- [6] N. Gudi, L. Wang, and V. Devabhaktuni, “Electrical Power and Energy Systems A demand side management based simulation platform incorporating heuristic optimization for management of household appliances,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 43, no. 1, pp. 185–193, 2012.
- [7] R. Q. Hu, J. Zhou, R. Q. Hu, and S. Member, “Scalable Distributed Communication Architectures to Support Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid Scalable Distributed Communication Architectures to Support Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid,” vol. 23, no. 9, pp. 1632–1642, 2012.
- [8] C. Vásquez and E. Inga, “State of Art, Channel Allocation of Cellular Network for Advanced Metering Infrastructure Based on Markov Chain,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 1, pp. 242–247, 2016.
- [9] G. Barai and K. Raahemifar, “Optimization of distributed communication architectures in advanced metering infrastructure of smart grid,” *Can. Conf. Electr. Comput. Eng.*, pp. 1–6, 2014.
- [10] D. Perez, E. Inga, and R. Hincapie, “Optimal sizing of a network for smart metering,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 5, pp. 2114–2119, 2016.
- [11] K. Taha, “RGFinder: A System for Determining Se-mantically Related Genes using GO Graph Minimum Spanning Tree,” *IEEE Trans. Nanobioscience*, vol. 1241, no. c, pp. 1–14, 2014.
- [12] A. Capone, D. Corti, L. Gianoli, and B. Sansó, “An optimization framework for the energy management of carrier ethernet networks with multiple spanning trees,” *Comput. Networks*, vol. 56, no. 17, pp. 3666–3681, 2012.
- [13] A. Bouchachia and M. Prosegger, “A hybrid ensemble approach for the Steiner tree problem in large graphs: A geographical application,” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 11, no. 8, pp. 5745–5754, 2011.
- [14] G. Robins and A. Zelikovsky, “Minimum steiner tree construction,” *Handb. Algorithms VLSI Phys. Autom.*, pp. 487–508, 2008.
- [15] C. Zhong, M. Malinen, D. Miao, and P. Fränti, “A fast minimum spanning tree algorithm based on K-means,” *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 295, pp. 1–17, 2015.
- [16] X. Han, J. Liu, D. Liu, Q. Liao, J. Hu, Y. Yang, and A. Steiner, “Distribution Network Planning Study with Distributed Generation Based on Steiner Tree Model,” vol. 1, pp. 2–6, 2014.
- [17] G. López, J. I. Moreno, H. Amarís, and F. Salazar, “Paving the road toward Smart Grids through large-scale advanced metering infrastructures,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 120, pp. 194–205, 2015.
- [18] E. Inga, G. Arevalo, and R. Hincapie, “Optimal deployment of cellular networks for Advanced Measurement

- Infrastructure in Smart Grid,” *2014 IEEE Colomb. Conf. Commun. Comput. COLCOM 2014 - Conf. Proc.*, 2014.
- [19] E. Inga and R. Hincapie, “Matched Channel Allocation for Advanced Metering Infrastructure based on Cognitive Mobile Virtual Network Operator,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 4, pp. 1780–1785, 2016.
- [20] D. F. Ramírez and S. Céspedes, “Routing in Neighborhood Area Networks: A survey in the context of AMI communications,” *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 55, pp. 68–80, 2015.
- [21] E. Inga, R. Hincapié, C. Suárez, and G. Arévalo, “Shortest Path for Optimal Routing on Advanced Metering Infrastructure using Cellular Networks,” *Commun. Comput. (COLCOM), 2015 IEEE Colomb. Conf.*, pp. 1–6, 2015.
- [22] E. Ancillotti, R. Bruno, and M. Conti, “The role of communication systems in smart grids: Architectures, technical solutions and research challenges,” *Comput. Commun.*, vol. 36, no. 17–18, pp. 1665–1697, 2013.
- [23] E. Inga-Ortega, A. Peralta-Sevilla, R. C. Hincapie, F. Amaya, and I. Tafur Monroy, “Optimal dimensioning of FiWi networks over advanced metering infrastructure for the smart grid,” *2015 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Lat. Am. ISGT LATAM 2015*, pp. 30–35, 2016.
- [24] E. Inga, D. Carrion, A. Aguila, E. Garcia, R. Hincapie, and J. W. González, “Minimal Deployment and Routing Geographic of PMUs on Electrical Power System based on MST Algorithm,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 5, pp. 2264–2270, 2016.
- [25] X. Wang, X. L. Wang, C. Chen, and D. M. Wilkes, “Enhancing minimum spanning tree-based clustering by removing density-based outliers,” *Digit. Signal Process. A Rev. J.*, vol. 23, no. 5, pp. 1523–1538, 2013.
- [26] P. Biswas and A. Paul, “Sequences Through A Variant of Prim ’ s Algorithm,” pp. 1–4, 2015.
- [27] G.-H. Lin and G. Xue, “Optimal layout of hexagonal minimum spanning trees in linear time,” *Proc. - IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, vol. 4, p. I-196-I-199, 2000.
- [28] T. Stützle, “Un Algoritmo Iterativo Voraz para el Problema del Taller de Flujo Rubén Ruiz,” pp. 1053–1074.
- [29] X. Lu, S. Yang, and N. Zheng, “Location-selection of Wireless Network Based on Restricted Steiner Tree Algorithm,” *Procedia Environ. Sci.*, vol. 10, pp. 368–373, 2011.
- [30] T. Matsumoto, T. Takahata, and K. T. Faculty, “TWO NEW EFFICIENT APPROXIMATION ALGORITHMS WITH $O(k \log k)$ FOR THE STEINER TREE PROBLEM IN RECTILINEAR GRAPHS,” pp. 1156–1159.
- [31] R. Qu, Y. Xu, J. P. Castro, and D. Landa-Silva, “Particle swarm optimization for the Steiner tree in graph and delay-constrained multicast routing problems,” *J.*

- Heuristics*, vol. 19, no. 2, pp. 317–342, 2013.
- [32] E. A. Alvarez, “UNIVERSIDAD DE TALCA FACULTAD DE INGENIERÍA PRIZE COLLECTING STEINER TREE CON DATOS.”
- [33] Y. Wang, X. Hong, T. Jing, Y. Yang, X. Hu, and G. Yan, “The polygonal contraction heuristic for rectilinear Steiner tree construction,” *Proc. 2005*, vol. 1, pp. 1–6, 2005.
- [34] A. Sadeghi and H. Fröhlich, “Steiner tree methods for optimal sub-network identification: an empirical study,” *BMC Bioinformatics*, vol. 14, p. 144, 2013.
- [35] G. Lin and G. Xue, “Steiner tree problem with minimum number of Steiner points and bounded edge-length,” vol. 69, pp. 53–57, 1999.
- [36] S. Lee and M. Younis, “Recovery from multiple simultaneous failures in wireless sensor networks using minimum Steiner tree,” *J. Parallel Distrib. Comput.*, vol. 70, no. 5, pp. 525–536, 2010.
- [37] Y. C. Wong and C. Chu, “A scalable and accurate rectilinear steiner minimal tree algorithm,” *2008 Int. Symp. VLSI Des. Autom. Test, VLSI-DAT*, pp. 29–34, 2008.
- [38] Q. Xie, C. Deng, H. Zhao, and Y. Weng, “Evaluation method for node importance of power grid based on the weighted network model [J],” ... *Electr. Power Syst.*, no. 1, pp. 9–12, 2009.
- [39] H. Nan, G. Wen-yan, and L. De yi, “Evaluate Nodes Importance in the Network Using Data Field Theory,” *Int. Conf. Conver. Inf. Technol. 2007*, pp. 1225–1234, 2007.
- [40] F. Kazemeyni, E. B. Johnsen, O. Owe, and I. Balasingham, “Group Selection by Nodes in Wireless Sensor Networks Using Coalitional Game Theory,” *2011 16th IEEE Int. Conf. Eng. Complex Comput. Syst.*, pp. 253–262, 2011.
- [41] Y. Zhu and X. Huang, “Node robust algorithm study based on graph theory,” *Proc. - 2011 8th Int. Conf. Fuzzy Syst. Knowl. Discov. FSKD 2011*, vol. 4, pp. 2300–2303, 2011.
- [42] M. Yiğit, Ö. D. Incel, and V. Ç. Güngör, “On the interdependency between multi-channel scheduling and tree-based routing for WSNs in smart grid environments,” *Comput. Networks*, vol. 65, pp. 1–20, 2014.
- [43] G. V Arévalo, R. C. Hincapié, and J. E. Sierra, “WDM-PON Design Model based on the Minimum Spanning Tree search over Delaunay Triangulations,” *IEEE Asia-Pacific Conf. Comput. Aided Syst. Eng.*, no. (Artículo en fase de revisión), pp. 4–7, 2015.
- [44] M. Prosegger and A. Bouchachia, “Ant colony optimization for Steiner tree problems,” *5Th Int. Conf. ...*, pp. 331–336, 2008.
- [45] M. Leitner, I. Ljubić, M. Luipersbeck, and M. Resch, “A partition-based heuristic for the steiner tree problem in large graphs,” *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect.*

Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics), vol. 8457 LNCS, pp. 56–70, 2014.

- [46] M. Zanchetta, R. Batista, W. R. Coimbra, M. Z. do Nascimento, V. R. Batista, and W. R.

Coimbra, “An interactive programme for Steiner trees,” *arXiv Prepr. arXiv1210.7788*, p. 9, 2012.

6.1 Matriz de Estado del Arte

Despliegue de MDMS para AMI mediante Arboles de expansion usando Minimum Steiner Tree																												
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	TEMÁTICA						FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO						RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCION PROPUESTA					
				INFRAESTRUCTURA DE MEDICIÓN AVANZADA - (AMI) "ESTADO DEL ARTE"	DESPLIEGUE DE MDMS	ARQUITECTURAS DE COMUNICACION	ARBOLES DE EXPANSION	STEINER TREE	MINIMUM STEINER TREE	COSTOS	TOPOLOGIAS DE COMUNICACION PARA AMI	TEORIA DE NODOS EN UNA RED COMPLEJA	TRIANGULACION DE REDES DE LAZOS	CLUSTERIZACIÓN	PROGRAMACION Y SIMULACION	Despliegue de MDMS	TEORIA DE GRAFOS	COSTOS	ENRUTAMIENTO Y DESPLIEGUE	CONDICIÓN DE CAPACIDAD	CONDICIONES DE COBERTURA	ALGORITMOS PARA EL PROGRAMACION LINEAL	METODO PROBLEMA ARBOL DE LAZOS	ALGORITMOS, HEURÍSTICA o METAHEURÍSTICAS	METODOS ARBOL STEINER MINIMO	PROGRAMACION LINEAL	ALGORITMOS PARA TEORIA DE GRAFOS MST	TRIANGULACION DELAUNAY
1	2014	Optimization of distributed communication architectures in advanced metering infrastructure of smart grid	\cite{Barai2014}	☒	☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒			☒		☒	☒	☒	☒	
2	2011	A hybrid ensemble approach for the Steiner tree problem in large graphs: A geographical application	\cite{Bouchachia2011}	☒			☒	☒			☒	☒								☒	☒		☒					
3	2014	Distribution Network Planning Study with Distributed Generation Based on Steiner Tree Model	\cite{Han2014}	☒				☒				☒			☒		☒	☒		☒	☒	☒	☒				☒	☒
4	2014	A Partition-Based Heuristic for the Steiner Tree Problem in Large Graphs	\cite{Leitner2014}					☒	☒	☒	☒				☒		☒		☒	☒	☒					☒		
5	2013	Red de medición avanzada (ami) circuito tvcable, suba	\cite{Medicion2013}	☒		☒		☒	☒		☒			☒	☒		☒	☒			☒			☒	☒			
6	2012	An interactive programme for Steiner trees	\cite{Nascimento2012}	☒		☒	☒	☒	☒	☒	☒		☒		☒	☒		☒		☒	☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒
7	2008	Ant colony optimization for steiner tree problems	\cite{Prosegger2008}			☒	☒	☒	☒	☒	☒		☒				☒			☒	☒	☒		☒			☒	
8	2012	Particle swarm optimization for the Steiner tree in graph and delay-constrained multicast routing problems	\cite{Qu2012}		☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒		☒		☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒		☒		☒	☒	
9	2014	A survey on Advanced Metering Infrastructure	\cite{RashedMohasse2014}	☒			☒	☒	☒		☒		☒	☒	☒	☒	☒	☒						☒	☒			
10	2008	Minimum steiner tree construction	\cite{Robins2008}		☒		☒	☒	☒	☒	☒				☒	☒	☒	☒		☒	☒	☒			☒		☒	☒
11	2013	Steiner tree methods for optimal sub-network identification: an empirical study	\cite{Sadeghi2013}	☒	☒		☒	☒	☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒
12	2014	RGFinder: A System for Determining Se-mantically Related Genes using GO Graph Minimum Spanning Tree.	\cite{Taha2014}		☒		☒		☒	☒	☒		☒	☒		☒	☒			☒					☒	☒		
13	2005	The Polygonal Contraction Heuristic for Rectilinear Steiner Tree Construction	\cite{Wang2005}		☒		☒	☒	☒	☒	☒		☒		☒	☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒			☒	☒	☒

Despliegue de MDMS para AMI mediante Arboles de expansion usando Minimum Steiner Tree																												
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	TEMÁTICA						FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO						RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCION PROPUESTA					
				INFRAESTRUCTURA DE MEDICIÓN AVANZADA - (AMID) ESTADO DEL ARBOL	DESPLIEGUE DE MDMS	ARQUITECTURAS DE COMUNICACIÓN	ARBOLES DE EXPANSION	STEINER TREE	MINIMUM STEINER TREE	COSTOS	TOPOLOGIAS DE COMUNICACIÓN PARA AMI	TEORIA DE NODOS EN UNA RED COMPLEJA	TRIANGULACION DE REDES	CLUSTERIZACIÓN	PROGRAMACION Y SIMULACION	Despliegue de MDMS	TEORIA DE GRAFOS	COSTOS	ENRUTAMIENTO Y DESPLIEGUE	CONDICIÓN DE CAPACIDAD	CONDICIONES DE COBERTURA	ALGORITMOS PARA EL PROBLEMA DE ARBOL DE PROGRAMACION LINEAL	METODO PROBLEMA ARBOL DE STEINER	ALGORITMOS, METODOS ARBOL STEINER MINIMO	PROGRAMACION LINEAL ENTERA ILP	ALGORITMOS PARA TEORIA DE GRAFOS MST	TRIANGULACION DELAUNAY	METODOS HEURISTICOS
14	2012	Scalable distributed communication architectures to support advanced metering infrastructure in smart grid	\cite{Zhou2012}	☒		☒	☒	☒		☒		☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒			☒		☒	☒	☒	☒
15	2015	Paving the road toward Smart Grids through large-scale advanced metering infrastructures	\cite{Lopez2015}	☒	☒	☒		☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒			☒		☒	☒	☒	☒	
16	2011	Location-selection of Wireless Network Based on Restricted Steiner Tree Algorithm	\cite{Lu2011}		☒	☒				☒	☒		☒		☒		☒	☒	☒		☒	☒	☒		☒		☒	☒
17	2012	A demand side management based simulation platform incorporating heuristic optimization for management of household appliances	\cite{Gudi2012}	☒		☒		☒		☒	☒		☒	☒	☒		☒	☒				☒		☒	☒	☒	☒	
18	2013	Toward smart distribution management by integrating advanced metering infrastructure	\cite{Li2013}	☒		☒	☒	☒		☒		☒		☒		☒		☒	☒			☒			☒	☒		
19	2015	Paving the road toward Smart Grids through large-scale advanced metering infrastructures	\cite{Lopez2015}	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒		☒		☒	☒	☒	☒	☒	☒			☒		☒	☒	☒	☒	
20	2015	Routing in Neighborhood Area Networks: A Survey in the Context of AMI Communications	\cite{Ramirez2015}	☒	☒	☒	☒	☒			☒	☒			☒	☒	☒	☒	☒					☒	☒			
21	2012	An optimization framework for the energy management of carrier ethernet networks with Multiple Spanning Trees	\cite{Capone2012}		☒	☒				☒					☒		☒				☒		☒		☒	☒		
22	2004	Un algoritmo multithreading para el problema del árbol de Steiner	\cite{Meneces}		☒			☒														☒	☒		☒		☒	
23		TWO NEW EFFICIENT APPROXIMATION ALGORITHMS WITH $O(k \log k)$ FOR THE STEINER TREE PROBLEM IN RECTILINEAR GRAPHS	\cite{Matsumoto}			☒			☒					☒								☒	☒	☒		☒		
24	2000	Optimal layout of hexagonal minimum spanning trees in linear time	\cite{Lin2000}		☒				☒													☒	☒	☒		☒		
25	2010	Recovery from multiple simultaneous failures in wireless sensor networks using minimum Steiner tree	\cite{Comput2010}		☒				☒	☒	☒		☒				☒					☒	☒	☒	☒	☒		☒
26	2008	A Scalable and Accurate Rectilinear Steiner Minimal Tree Algorithm	\cite{Wong2008}		☒		☒	☒	☒		☒						☒					☒	☒	☒	☒		☒	☒
27	1999	Steiner tree problem with minimum number of Steiner points and bounded edge-length	\cite{Lin1999}	☒		☒		☒	☒					☒								☒	☒	☒	☒		☒	☒
28	2015	A fast minimum spanning tree algorithm based on K - means	\cite{Zhong2015}		☒	☒			☒					☒				☒		☒					☒			
29	2014	On the interdependency between multi-channel scheduling and tree-based routing for WSNs in smart grid environments	\cite{Yigit2014}	☒	☒	☒		☒		☒	☒	☒			☒		☒	☒	☒			☒		☒		☒		

Despliegue de MDMS para AMI mediante Arboles de expansion usando Minimum Steiner Tree

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	TEMÁTICA							FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO						RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCION PROPUESTA							
				INFRAESTRUCTURA DE MEDICIÓN AVANZADA - (AMI)	DESPLIEGUE DE MDMS	ARQUITECTURAS DE COMUNICACIÓN	ARBOLES DE EXPANSION	STEINER TREE	MINIMUM STEINER TREE	COSTOS	TOPOLOGIAS DE COMUNICACIÓN	TEORIA DE NODOS EN UNA RED	TRIANGULACION DE REDES INALAMBRICAS	CLUSTERIZACIÓN	PROGRAMACION Y SIMULACION	Despliegue de MDMS	TEORIA DE GRAFOS	COSTOS	ENRUTAMIENTO Y DESPLIEGUE	CONDICIÓN DE CAPACIDAD	CONDICIONES DE COBERTURA	ALGORITMOS PARA EL PROBLEMA	PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA	METODO PROBLEMA ARBOL DE STEINER	ALGORITMOS, HEURÍSTICA o METAHEURÍSTICAS	METODOS ARBOL STEINER MINIMO	PROGRAMACION LINEAL ENTERA	ALGORITMOS PARA TEORIA DE	TRIANGULACION DELAUNAY	METODOS HEURISTICOS	DESPLIEGUE ARBOL DE STEINER MINIMO
30	2015	Minimum-loss network reconfiguration : A minimum spanning tree problem	\cite{Ahmadi2015}		☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒				☒		☒		☒		☒					☒	☒			
31	2013	Enhancing minimum spanning tree-based clustering by removing density-based outliers	\cite{Wang2013}		☒		☒	☒		☒	☒	☒				☒		☒		☒		☒		☒		☒	☒				
32	2013	The role of communication systems in smart grids : Architectures , technical solutions and research challenges	\cite{Ancillotti2013}	☒	☒	☒	☒	☒		☒	☒	☒			☒	☒		☒	☒			☒			☒	☒					
33	2007	Evaluate Nodes Importance in the Network using Data Field Theory	\cite{Nan2007}		☒			☒			☒					☒						☒				☒					
34	2009	Evaluation of the Importance of Network Nodes Based on Weighted Network Model	\cite{Changhong2009}		☒			☒		☒						☒						☒				☒					
35	2011	Group Selection by Nodes in Wireless Sensor Networks Using Coalitional Game Theory	\cite{Kazemeyni2011}		☒			☒		☒		☒			☒	☒						☒		☒		☒					
36	2011	Node Robust Algorithm Study Based on Graph Theory	\cite{Zhu2011}		☒			☒		☒	☒			☒		☒			☒		☒		☒		☒		☒				
37	2015	WDM-PON Design Model based on the Minimum Spanning Tree search over Delaunay Triangulations	\cite{Arevalo2015}					☒	☒		☒		☒	☒						☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒		☒	☒		
38	2015	Sequences Through A Variant of Prim ' s Algorithm	\cite{Biswas2015}		☒		☒			☒	☒		☒	☒						☒	☒		☒		☒			☒			
39	2010	UNIVERSIDAD DE TALCA FACULTAD DE INGENIERIA PRIZE COLLECTING STEINER TREE CON DATOS	\cite{Alvarez}	☒		☒	☒	☒	☒	☒		☒	☒		☒	☒		☒	☒	☒		☒	☒	☒		☒	☒	☒	☒		
CANTIDAD:				17	25	16	12	21	21	20	24	21	23	8	18	7	15	17	23	18	19	4	20	16	30	9	20	12	25	19	9

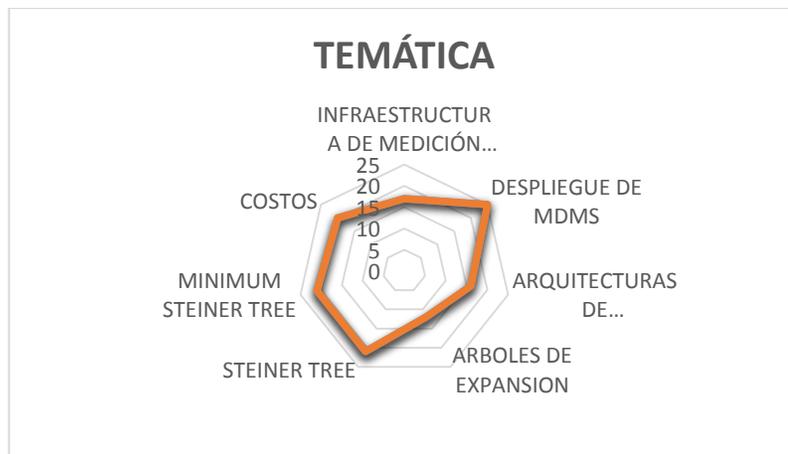


Figura 15. Indicadores del Estado del Arte-Temática

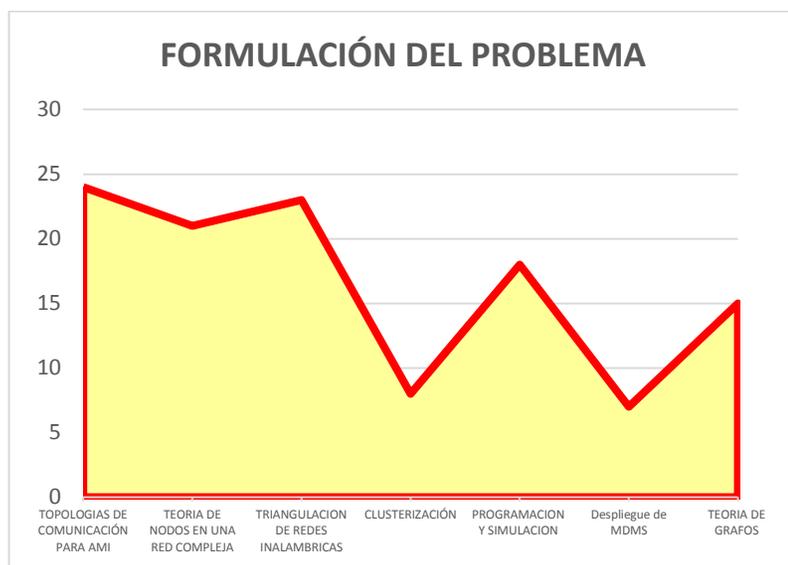


Figura 16. Indicadores del Estado del Arte-Formulación del problema

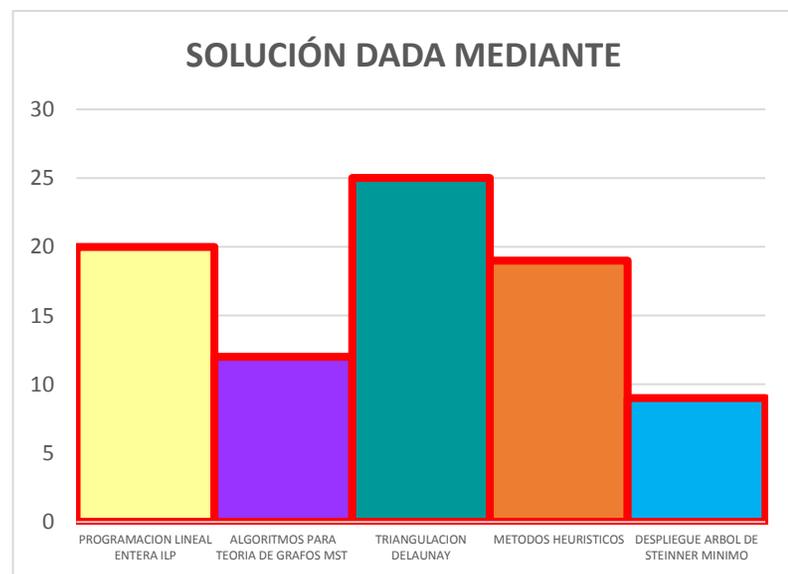


Figura 17. Indicadores del Estado del Arte-Solución