

**CLUSTERIZACIÓN Y TRIANGULACIÓN DE REDES INALÁMBRICAS
HETEROGÉNEAS PARA LA INFRAESTRUCTURA DE MEDICIÓN
AVANZADA DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

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

**TEMA:
CLUSTERIZACIÓN Y TRIANGULACIÓN DE REDES INALÁMBRICAS
HETEROGÉNEAS PARA LA INFRAESTRUCTURA DE MEDICIÓN
AVANZADA DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

**AUTOR:
CRISTIAN XAVIER GANÁN GAÍNZA**

**DIRECTOR:
ESTEBAN MAURICIO INGA ORTEGA**

Quito, noviembre 2015

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo CRISTIAN XAVIER GANÁN GAÍNZA., con documento de identificación N° 1725796286, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy/somos autor/es del trabajo de grado/titulación intitulado: “CLUSTERIZACIÓN Y TRIANGULACIÓN DE REDES INALÁMBRICAS HETEROGENEAS PARA LA INFRAESTRUCTURA DE MEDICIÓN AVANZADA DE ENERGÍA ELÉCTRICA”, 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/es me/nos reservo/reservamos 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.

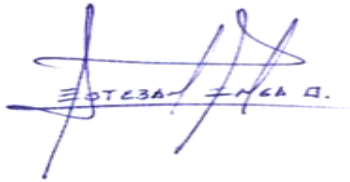


Cristian Ganán Gaínza
1725796286
26 de Noviembre del 2015

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *clusterización y triangulación de redes inalámbricas heterogeneas para la infraestructura de medición avanzada de energía eléctrica* realizado por Cristian Xavier Ganán Gaínza, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, 26 de Noviembre de 2015

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "ESTEBAN INGA O.", is written over a horizontal line.

Esteban Mauricio Inga Ortega

0102116043

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
2. DESPLIEGUE DE REDES HETEROGÉNEAS PARA LA INFRAESTRUCTURA DE MEDICIÓN AVANZADA	4
2.1 Algoritmos de Clusterización	4
2.1.1 K-means.....	4
2.1.2 K-medoids.....	5
2.1.3 Mean Shift.....	5
2.2 Algoritmos de Triangulación	6
2.1.1 Voronoi.....	6
2.1.2 Delaunay.....	7
2.1.3 Árbol de mínima expansión.....	8
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	8
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	12
5. CONCLUSIONES	14
6. REFERENCIAS	16

ÍNDICE DE FIGURAS

1. Redes Heterogéneas para la Infraestructura de Medición Avanzada con cobertura y MST.....	3
2. Obtención de centroides por K-means con 256 SMs.....	12
3. Obtención de centroides por K-medoids con 256 SMs.....	12
4. Obtención de centroides por Mean Shift con 256 SMs.....	12
5. Número de clústeres en función de SMs.....	13
6. Rendimiento en función del número de SMs por algoritmo.....	13
7. Cobertura por Delaunay/Voronoi e infraestructura por MST.....	14
8. Delaunay/Voronoi y MST con 512 SM.....	14

CLUSTERIZACIÓN Y TRIANGULACIÓN DE REDES INALÁMBRICAS HETEROGENEAS PARA LA INFRAESTRUCTURA DE MEDICIÓN AVANZADA DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Cristian Ganán ¹, Esteban Inga ²



¹ Estudiante de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana Ecuador – Sede Quito. Correo: cganan@est.ups.edu.ec.

² Estudiante Doctoral en Ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana Medellín Colombia - Máster en Educación y Desarrollo Social, Ingeniero Electrónico – Coordinador del Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes – Director de Carrera de Ingeniería Eléctrica – UPS - Sede Quito. Correo: einga@ups.edu.ec

Resumen

En este artículo se plantea la comparación de algoritmos de clusterización, triangulación y el árbol de mínima expansión sobre redes heterogéneas inalámbricas, los mismos que se aplicarán para el despliegue de la red de comunicaciones de la infraestructura de medición avanzada, etapa importante para el desarrollo de redes eléctricas inteligentes en lo que respecta al intercambio de información entre el medidor inteligente del cliente y las empresas de distribución eléctrica, formando así una red de área de vecindario.

Los algoritmos de clusterización comparados en este trabajo advierten escenarios georeferenciados para aglutinar y formar conglomerados de medidores inteligentes; por otro lado los algoritmos de triangulación se usan para escenarios entre regiones para formar los sectores de la red de área de barrio. En un segundo instante se espera conocer el algoritmo que tiene un mejor rendimiento, minimice la cantidad de clústeres necesarios para aglutinar la población de medidores y luego permita optimizar mejor el árbol de expansión para la conexión de clústeres obteniendo la mejor cobertura por medio de la dualidad Voronoi-Delaunay.

Palabras Clave: Clusterización, Infraestructura de Medición Avanzada, Redes Eléctricas Inteligentes, Redes Heterogéneas, Triangulación.

Abstract

This article is intended to comparing clustering algorithms, triangulation and minimal spanning tree on heterogeneous networks raises them to be applied for the deployment of the communications network of the advanced metering infrastructure, important for the development of smart grids as regards stage the exchange of information between the smart meter customer and electricity distribution companies, thus forming a neighborhood area network (NAN).

Clustering algorithms compared here warn georeferenced scenarios to bind and form clusters of smart meters; Furthermore triangulation algorithms are employed to solve scenarios between regions to form segments of a neighborhood area network. On the other hand, they hope to know the best algorithm comparing the performance and the algorithm that minimizes the number of cluster to cover all meter population. Moreover, the algorithm helps to optimize the minimal spanning tree to connect the clusters obtaining the best coverage through the union of Voronoi-Delaunay for triangulation

Keywords: Clustering, Advanced Metering Infrastructure, Smart Grid, Heterogeneous Network, Triangulation.

1. Introducción

Una red inteligente se ha convertido en una necesidad que es estudiada en varios aspectos, uno de ellos es la comunicación; esto debido a las diversas ventajas que presenta, incluyendo la respuesta a la demanda, la gestión de cortes y fallas, prevención de desastres, servicio prepago y otros. Para lo que se requiere contar con una infraestructura física adecuada que permita la comunicación bidireccional de la infraestructura de medición inteligente (AMI) [1].

Hay que considerar varios requerimientos para contar con red inteligente: entrada de nuevos usuarios y consumidores, entrada de nuevas cargas (vehículos eléctricos, generación distribuida y otros); por lo cual se debe contar con una red que sea fácilmente adaptable y robusta para mantener los objetivos de las redes inteligentes. Además la topología indicada

permitirá que desde los medidores la información llegue a los puntos de agregación de datos universal (Universal Data Aggregation Points UDAPs), luego hacia los concentradores de información y por supuesto hacia un gran centro de control que será el alimentador del sistema [2][3].

Uno de los grandes problemas por lo cual será necesario realizar agrupamientos por medio de técnicas de clúster es la heterogeneidad (Wireless Heterogeneous Network - WHN) de los sistemas, es decir la gran cantidad de dispositivos que deben ser interconectados, los dispositivos tienen ciertas restricciones de hardware, incluyendo la capacidad de almacenamiento, los sistemas que están incorporados e inclusive las interfaces y protocolos empleados, además el uso de redes que tienen diversos protocolos interconectadas será de gran utilidad ya que mejora la robustez, la conectividad y el rendimiento [4] [5] [6].

Las técnicas de clusterización permiten la organización de la topología de la red en una forma jerárquica, habiéndose desarrollado varias técnicas para generar clústeres. Cuando una red se divide en diversos clústeres se vuelve más manejable, debe quedar claro que no es una técnica para enrutamiento, consiste en agregar nodos hacia grupos planteados o clústeres que son un subgrupo satisface ciertas características, en función de la similitud que presenten [7].

El manejo de clústeres presenta ciertas ventajas como un mejor control de protocolos, capacidad para adaptabilidad y escalabilidad más simple, fácil interoperabilidad; además el enrutamiento sólo se deba realizar entre las cabeceras de los clústeres. El propósito de los algoritmos o técnicas de clusterización es la formación y el mantenimiento de la conexión de clústeres. Los miembros típicos de un clúster son los nodos ordinarios, los que

actúan como frontera y los nodos cabecera, que para AMI son UDAPs [7] [8].

Los nodos de sensado se organizan mediante clústeres jerárquicamente agrupando, de tal forma que la información se procese localmente previo a su paso hacia estaciones concentradoras. Este es un método prometedor para la organización eficiente de una red. Se debe reconocer que el proceso de comunicación dentro y entre clústeres es de tipo multi-salto (multihop) es decir la llegada de información hacia un punto se realiza cruzando por otros nodos [9].

Para ello será necesario que los clústeres formen una Teselación de Voronoi del campo de medidores inteligentes, que trabajando en forma complementaria con las triangulaciones de Delaunay serán un método eficiente de conexión de la infraestructura de medición. Cada SM escogerá el camino más corto a seguir en

función de la clusterización por medio de 3 métodos que serán comparados en el presente trabajo [10] [11].

La figura 1 indica la arquitectura básica de una red heterogénea inalámbrica para la infraestructura de medición avanzada y su importancia en un entorno de posición geo-referenciada de cada componente de la red. Se puede apreciar la infraestructura de medición inteligente, estableciendo por medio de clusterización redes heterogéneas en las que se minimice el número de dispositivos a colocar para recolección, luego se determina que exista una cobertura óptima mediante la combinación de Delaunay (morado) y Voronoi (celeste) para por medio del árbol de mínima expansión (MST) se forme una red que integre todos los UDAPs implementados.

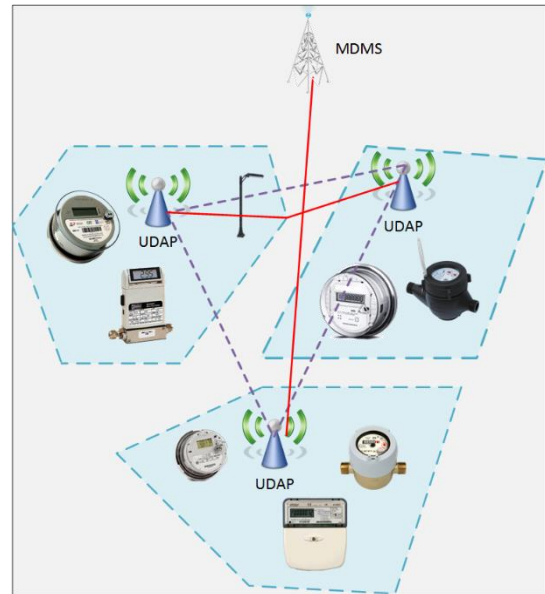


Figura 1: Redes Heterogéneas para la Infraestructura de Medición Avanzada con cobertura y MST.

En adelante, este artículo será compuesto de la siguiente manera: En la sección 2 los requerimientos para despliegue de redes heterogéneas. En la sección 3 se describe la formulación del problema. En la sección 4 se presentan los resultados con los escenarios geo-referenciados. Finalmente se presentan las conclusiones de este artículo en la sección 5.

2. Despliegue de redes heterogéneas para la infraestructura de medición avanzada.

La arquitectura que se vaya a implementar debería ser ideal para que se conecte varios dispositivos que forman una red heterogénea para AMI en la que se involucra protocolos para conseguir interoperabilidad; de esta manera en los puntos de concentración posteriormente se manejará un único medio de transmisión; existiendo un ancho de banda independiente; con gran capacidad, adaptabilidad, escalabilidad y facilidad de soportar nuevos usuarios y sistemas que se complementen y mejoren los servicios para usuarios y distribuidoras [12]. Para ello se requiere de algoritmos robustos que conjugados permitan un despliegue de red óptimo respecto de los recursos empleados.

2.1 Algoritmos de Clusterización

Los algoritmos particionales como los que se presentan más adelante se caracterizan por dividir la población en un número especificado de grupos de afinidad o que comparten características denominado clúster. Existirá un número K -ésimo de clústeres que engloban a todo un conjunto o población Z . El objetivo de los algoritmos es minimizar el número de clústeres necesarios para que cada miembro de Z se pueda conectar con al menos una cabecera de clúster, basado en criterios que ya están establecidos para cada proceso. [13].

2.1.1 K-means

Algoritmo de orden iterativo; que se inicia con un número K de centroides dado, normalmente es randómico o ajustado al caso específico; luego cada punto es asignado a la cabecera de clúster que esté más cercano al mismo, para completar los centroides se vuelven a calcular de tal forma que se cumplan los parámetros establecidos que incluyen la cantidad de usuarios que

pueden formar parte del clúster; el proceso se repite hasta que converja a lo planteado.

Una de las características del algoritmo es que trabaja con una función de “peso” única; de tal forma que todos los parámetros a cumplir tienen la misma importancia; siendo dependiente de que los datos y las condiciones iniciales sean adecuadas [13].

2.1.2 K-medoids

Este es un algoritmo bastante similar a K-means, en este caso los centroides o medoides se toman de los mismos datos con que se alimenta a la técnica y el objetivo es que la cabecera de los clústeres se encuentre ubicada lo más céntrica posible a los miembros de tales agrupaciones, logrando que los patrones establecidos se cumplan [13].

Es más robusto al ruido y grandes cantidades de datos, no usa los valores cuadráticos sino las diferencias entre pares;

usa medoides (punto más céntrico del clúster) en vez de centroides [13].

Se colocan centros semilla de los clústeres, luego se asignan a cada individuo hacia el clúster más cercano en función de distancia geodésica. Se complementa cuando se calcula un nuevo centro de cada grupo; en forma iterativa hasta encontrar convergencia [13].

2.1.3 Mean Shift

Este algoritmo de agrupamiento o de formación de clúster de forma automática determina el número de clústeres necesarios para cubrir a toda la población; trabaja bien con clúster de forma establecida. Se basa en el uso de probabilidad y de estimadores de Kernel en el espacio de entrada. El principio es hallar la moda en cada punto de concentración de población; haciendo que por medio de iteraciones de punto fijo, los estimadores se muevan hacia los lugares que poseen una mayor densidad; cuando los

kerneles alcanzan estabilidad, los que se encuentran cerca se juntan; luego los datos o la población se dividen según los kerneles existentes [13].

El algoritmo para ser preciso depende en gran medida de que el ancho de banda para la búsqueda de las zonas de concentración sea adecuado o se adapte al caso específico que se requiere resolver [13].

2.2 Algoritmos de Triangulación

El propósito es que se tenga una buena cobertura y una excelente capacidad de respuesta frente a eventos; para esto se trata la implementación de la teselación de Voronoi y la triangulación de Delaunay trabajando en forma complementaria para interconectar los clústeres una vez que fueron formados [10], [14] [15] [16].

Se debe indicar que cuando los nodos del sistema se encuentran en exteriores y en grandes extensiones como en la aplicación para AMI es necesario contar con una forma de determinar la posición exacta mediante GPS y georreferenciación, de esta forma se puede determinar la existencia de obstáculos y cambios en la altura, minimizando así los tiempos para el despliegue de la red heterogénea [10], [14] [15] [16].

2.2.1 Voronoi

El diagrama Voronoi es un método centralizado para la resolución del problema de la peor cobertura. Para entender a la Teselación de Voronoi se considera un grupo de puntos A en el espacio S^2 . Cada celda de Voronoi deberá tener un tamaño adecuado que varía en función del número de nodos existentes, por

tanto la celda no debe ser ni tan delgada ni tan gruesa [15].

Las distancias para determinar la cercanía se miden por segmentos de grandes círculos que pertenecen imaginariamente a una esfera y que interconectan los puntos. En el plano formado las celdas no tendrán una forma similar. Además se cumplen propiedades como que la celda Voronoi contiene un disco de radio ϵ y es contenida por un círculo de radio 2ϵ [15] [17].

Toda celda Voronoi es un polígono porque son el resultado del cruce de semiesferas en un plano; así existen puntos comunes entre las celdas adyacentes; con lo cual el rango de comunicación del equipo establecido en los centros será tanto de la misma celda como hacia sus adyacentes [15] [18].

Una región o celda Voronoi o $Vor(p)$ de un vértice de A_i de una región S es un conjunto de puntos georreferenciados tal que cada

punto es cercano a un punto A_i (conocido como generador de celda) respecto a cualquier otro punto A_j perteneciente a S ; más adelante el diagrama de Voronoi es la unión de todas las regiones Voronoi [15].

2.2.2 Delaunay

La triangulación Delaunay es una dualidad del diagrama de Voronoi donde dos vértices p y q se unen por medio de líneas rectas, y será conocida como $Del(S)$. Según [16] $Del(S)$ conecta los puntos p y q sólo cuando $Vor(p)$ y $Vor(q)$ comparten un límite común, tal límite se conoce como vértice Voronoi, y siempre es el circuncentro de un triángulo de Delaunay [16][17], [19].

$Del(S)$ puede ser considerada así solo cuando el circuncentro de cada uno de sus triángulos no contiene ningún otro vértice de S en su interior. La triangulación de Delaunay maximiza el ángulo mínimo de

todos los ángulos de los triángulos. En este caso lo que se conectará por medio de triangulaciones para asegurar la cobertura del espacio en estudio son los UDAPs resultantes en los centroides obtenidos por medio de clusterización [16], [20].

2.2.3 Árbol de mínima expansión

El algoritmo del árbol de mínima expansión o *minimum spanning tree* (MST) está basado en la teoría de grafos y puede ser resuelto bajo diversos algoritmos incluyendo el de Prim o el de Kruskal que han mostrado en trabajos previos hallar la ruta con la que se logra cubrir toda la demanda seleccionando la menor cantidad de dispositivos logrando la optimización del costo [21] [22].

MST se advierte en primer paso que corresponde a la formación de un grafo G $(V, E, W_{i,j})$ que contenga todas las

conexiones E entre el i -ésimo y el j -ésimo pares de vértices V que en el estudio representan a los UDAPs ubicados en los centroides. Cada conexión tiene un peso específico $W_{i,j}$ que corresponde a la distancia que existe entre ellos [23] [24].

3. Planteamiento del Problema

Se establecen escenarios con una N cantidad de SM dentro de un entorno georeferenciado en el que se pretende obtener la mejor solución para agrupar a la población de medidores inteligentes heterogénea con algoritmos de clusterización, en este caso Mean Shift, K-means y K-medoids; ubicando en los centroides de clúster UDAPs; formando posteriormente áreas de cobertura por medio de Delaunay y Voronoi en forma conjunta.

En una red wireless, cada dispositivo va a tener un rango específico de alcance de la cobertura, cuando se pretende conectar un dispositivo u con v y no están en el rango de alcance correspondiente, será necesaria la existencia de una red multihop, usando nodos intermedios. Se entiende por ello que la arquitectura será distribuida, con un costo homogéneo asociado a la comunicación.

Uno de los problemas que se propone a través del presente trabajo es la maximización de observabilidad de todos los puntos de la red, es conocido como problema de la mejor cobertura que puede ser resuelto a través de la triangulación de Delaunay; mientras que el problema de peor cobertura se establece a través de los diagramas de Voronoi; ambos trabajan en forma conjunta, teniendo como base un grafo $G(V,E)$ que representa todos los nodos que deben conectarse, denotando que existe una red de tipo heterogénea.

Para ello, se indica que entre un punto A_i que es el centroide y un set de puntos V las distancias que se formen $d(x,V)$ calculadas a través de la fórmula de Haversine deben ser minimizadas; la cantidad de puntos pertenecientes a V van a depender de la capacidad de usuarios que tenga el equipo colocado en el centroide, a pesar de que el autor de [20] indica que puede contenerse un valor infinito. Por otro lado se denota que la distancia de cobertura del sistema no será simétrica, se tratará de que el camino seleccionado sea aquel en el que la información viaje la menor distancia total promedio.

La resolución de los problemas de conglomeración, la mejor y la peor cobertura en conjunto se realiza por medio del algoritmo.

Algoritmo de conglomeración y solución de mejor y peor cobertura de población

Paso 1: Geo-referenciar población de SMS

Paso 2: Establecer distancia de cobertura y número de usuarios por clúster

Paso 3: Generar clústeres en función K-means, K-medoids, Mean Shift

Paso 4: **Para todo:** Cluster i U Cluster j
Interconectar clústeres
Minimizar distancia para triangulaciones

Paso 5: Analizar alternativa minimiza número de clústeres.

Paso 6: **Para todo:** Clúster formado de mejor alternativa

Haga: Triangulación de Delaunay
Teselación de Voronoi

Paso 7: Formar diagrama de Voronoi con toda la población.

Terminar

Una vez el diagrama de Voronoi y las triangulaciones Delaunay se han establecido con la mejor alternativa de clústeres de poblaciones con las restricciones planteadas, se origina un nuevo problema por medio de teoría de grafos únicamente con los UDAPs a través del árbol de mínima expansión, de tal forma que se obtenga una topología óptima para el intercambio de la información entre UDAPs

y, en los últimos nodos hacia los centros de concentración de los datos. Se plantea la existencia de un conjunto de nodos V con E como el conjunto de enlaces existentes entre pares de vértices, existiendo un grafo $G(V,E,W)$ que representa la topología de la red como ya estuvo planteado antes. La resolución del árbol óptimo va a ser realizada por medio de una heurística de tal forma que se determine la solución más cercana a la óptima en la que se debe minimiza la ecuación 1.

Función Objetivo:

$$\min \sum_{(i,j) \in E} W_{i,j} \times X_{i,j} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{e_{i,j} \in E} X_{i,j} = N - 1 \quad (2)$$

$$\sum_{e_{i,j} \in E} X_{i,j} \geq 1; \forall B \subset V, i \in B, j \in B \quad (3)$$

El objetivo es minimizar la distancia que deba recorrerse de i hacia j según el peso y

donde $X_{i,j}$ vale 1 si el enlace existe y pertenece al árbol A, mientras que tiene un valor de 0 en caso contrario. B es un subconjunto cualquiera de nodos correspondiente (UDAPs). La restricción (2) implica que deben existir al menos N-1 conexiones candidatas para establecer el árbol.

La ecuación (3) indica que para realizar la optimización propuesta debe existir más de 1 enlace factible de tal forma de se pueda escoger el que tenga un peso minoritario. De esta forma se vuelve factible la formación de un árbol con un conjunto de enlaces $A=\{e_1,e_2,\dots,e_n\}$ que tenga un costo mínimo de implantación y permita la llegada de la información hacia los centros de concentración proveniente de los usuarios recogida por medio de puntos de agregación de datos universales y que posteriormente será transmitida a los centros de gestión de datos de la demanda. Por otro lado se logra el paso multicast de la

información a través de saltos multihop, es decir que la información se transmita desde cualquier punto de la red planteada hacia otro sin ningún problema y recorriendo una distancia mínima sin importar el medio que vaya a ser empleado para tal efecto. El algoritmo que permite la obtención del árbol de mínima expansión entre UDAPs es el siguiente:

Algoritmo de enrutamiento MST entre UDAP

Paso 1: Leer archivo OSM con límites

Paso 2: Graficar sitios candidatos elegidos UDAPs, SM.

Paso 3: Para todo: $i \in B$ y $j \in B$

Haga: Unión de nodos con todos los enlaces posibles.

Paso 4: Si $W_{i,j}$ es el menor de los existentes

Haga: Enlace $i,j \in$ Árbol A

Paso 5: Problema principal: **encuentre** árbol de expansión óptimo A, con enlaces i,j con $W_{i,j}$ más pequeños con Prim.

Paso 6: Graficar árbol de expansión con los sitios candidatos escogidos.

Terminar

4. Análisis de Resultados

Se ha analizado escenarios georreferenciados en los cuales existen 64, 128, 256 y 512 SMs para comparar los sistemas de clusterización, a través de la figura 2, 3 y 4 escenarios de 256 SMs para algoritmo de K-means, de K-medoids y de Mean-Shift respectivamente, cada clúster puede abarcar una distancia de 70 metros y un máximo de 26 usuarios. La primera gráfica presenta los clústeres por medio de K-means, notándose que los centroides no están centralizados respecto a la población de medidores que aglutina y existe una distribución equilibrada del número de miembros por cada clúster formado.

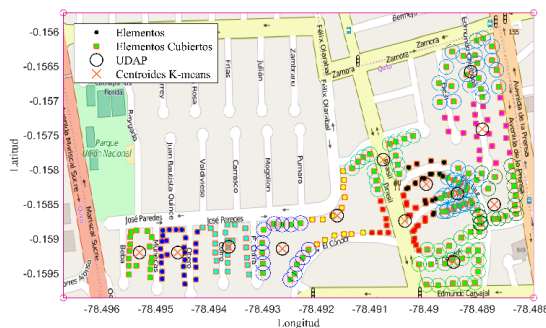


Figura 2: Obtención de centroides por K-means con 256 SMs

Se puede notar que el algoritmo de K-medoids obtiene menos centroides y es más equilibrada la cantidad de usuarios por cada grupo.

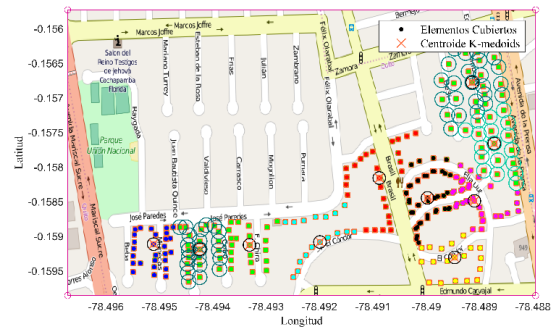


Figura 3: Obtención de centroides por K-medoids con 256 SMs

Con el algoritmo de Mean Shift existen clústeres con grandes cantidades de usuarios y otros en los que hay pocos miembros, se nota que el centroide está más céntrico.

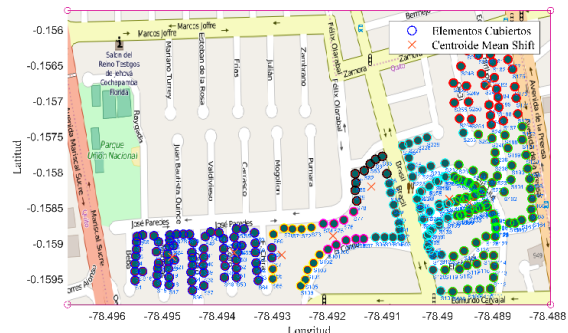


Figura 4: Obtención de centroides por Mean Shift con 256 SMs

El algoritmo de K-means ha obtenido la mayor cantidad de clústeres necesarios para que la población esté cubierta y que K-medoids con Mean Shift han arrojado resultados similares cuando la población es más grande.

Lo que se ha obtenido es que cada uno de los algoritmos en su solución obtiene distinto número de clústeres y que existe un error por cada simulación realizada respecto al número obtenido e incluso la cantidad de miembros que tiene cada clúster, notado a través de la figura 5 en la que se encuentra la cantidad de clústeres por número de medidores, aquí se establece con claridad que por medio de Mean Shift se obtiene la menor cantidad de clústeres con una población reducida, cuando la población es mayor se obtiene resultados similares con k-medoids y se denota que con k-means la cantidad de clústeres necesaria siempre es mayor.

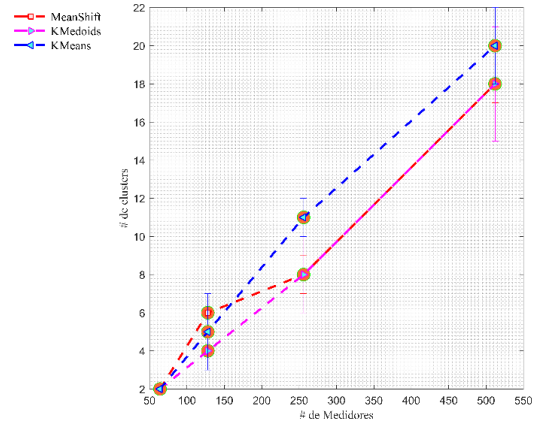


Figura 5: Número de clusters en función de SMs

En la figura 6 se establece el rendimiento, las simulaciones se han realizado con un PC Core I7 de 3ra generación de 2.4 Ghz y 8 GB en RAM; en este caso se denota que los tiempos mayores para la obtención de clústeres son los de K-means y los menores de Mean Shift mientras que en un punto medio está el algoritmo K-medoids.

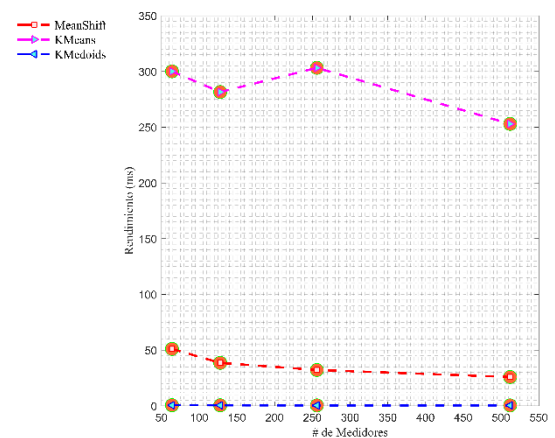


Figura 6: Rendimiento en función del número de SMs por algoritmo

Finalmente por medio de la figura 7 se puede establecer la cobertura de todas los clústeres establecidos a través de la dualidad Delaunay-Voronoi y luego el MST para el establecimiento de la ruta de conexión de UDAPs en forma física para en el último tramo conectarse a un concentrador de datos MDMS.

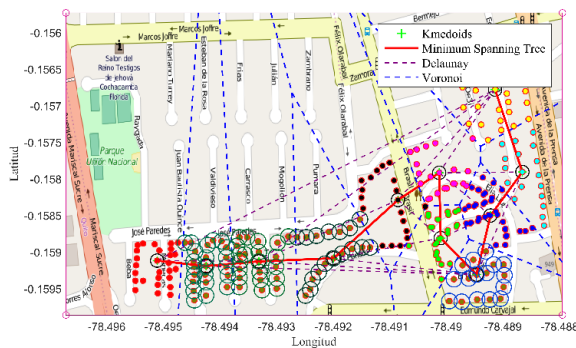


Figura 7: Cobertura por Delaunay/Voronoi e infraestructura por MST

La figura 8 muestra el escenario más grande que se ha planteado y se lo indica por medio de K-means en la que se denota con claridad que las Teselaciones de Voronoi tienen formas muy diferentes en cada caso o clúster y que las triangulaciones Delaunay se forman con todos los puntos cercanos.

Respecto al algoritmo del árbol de mínima expansión es claro que en todos los casos se unen todos los UDAPs para lograr la topología óptima cumpliendo con el objetivo mayor que es garantizar la máxima cobertura.

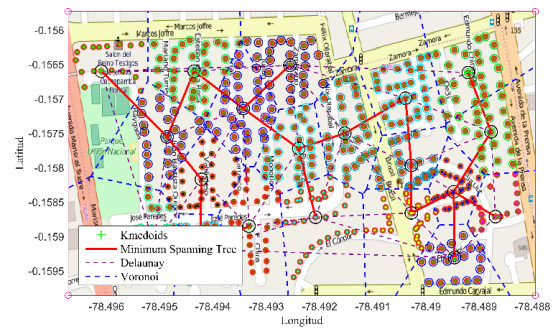


Figura 8: Delaunay/Voronoi y MST con 512 SM

5. Conclusiones

Los algoritmos que se han planteado permiten obtener una red para la infraestructura de medición inteligente en los que se analiza en primera instancia el aglutinamiento de una población de medidores inteligentes por medio de clusterización basado en la utilización de tres técnicas diferentes: K-means, K-medoids y Mean Shift para la comparación respecto a la minimización del número de

clústeres para abarcar todos los medidores y respecto al rendimiento computacional en la obtención de los clústeres. El algoritmo de K-medoids ha mostrado ser el más estable, eficiente y que minimiza la cantidad de clústeres, además se destaca porque los centros donde serán ubicados los UDAPs tiene localizaciones más cercanas al centro del clúster.

En una segunda instancia se ha buscado la resolución del problema de la mejor y la peor cobertura de la población basado en el uso de la dualidad de Voronoi y Delaunay con lo cual se forman celdas que cubren a cada uno de los clústeres y la triangulación de Delaunay establece las rutas para la interconexión de las redes heterogéneas existentes, de tal forma que el sistema esté asegurado que esté cubierto y con un costo reducido debido a la menor cantidad de elementos que se requieren para contar con una infraestructura óptima.

En última instancia está el algoritmo del árbol de mínima expansión, con el mismo se establece una ruta que abarque a todos los UDAPs ubicados en los centroides para que por medio de una heurística se obtenga la solución más cercana a la óptima; lo que va a permitir una comunicación entre cualquier punto de agregación universal por medio de la estructura multi-salto y posteriormente que la información que fue agrupada por medio de estos sistemas sea enviada hacia los grandes centros de concentración y de procesamiento de los datos.

En planteos futuros se pretenderá que la optimización sea ejecutada de tal forma de minimizar los costos asociados a la implementación mientras que la cobertura sea la mejor posible, y además simulaciones de los escenarios geo-referenciados planteados.

Referencias

- [1] C. Bennett and D. Highfill, “Networking AMI Smart Meters,” *2008 IEEE Energy 2030 Conf.*, vol. 402, no. November, pp. 1–8, 2008.
- [2] E. Inga, G. Arevalo, and R. Hincapié, “Optimal Deployment of Cellular Networks for Advanced Measurement Infrastructure in Smart Grid,” *Commun. Comput. (COLCOM), 2014 IEEE Colomb. Conf.*, pp. 1–6, 2014.
- [3] V. C. Gungor, B. Lu, and G. P. Hancke, “Opportunities and Challenges of Wireless Sensor Networks in Smart Grid,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 10, pp. 3557–3564, 2010.
- [4] R. Draves, J. Padhye, and B. Zill, “Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks,” *Proc. 10th Annu. Int. Conf. Mob. Comput. Netw. - MobiCom '04*, pp. 114–128, 2004.
- [5] N. Saputro, K. Akkaya, and S. Uludag, “A survey of routing protocols for smart grid communications,” *Comput. Networks*, vol. 56, no. 11, pp. 2742–2771, 2012.
- [6] G. V. Crosby, N. Pissinou, and J. Gadze, “A Framework for Trust-based Cluster Head Election in Wireless Sensor Networks,” *Second IEEE Work. Dependability Secur. Sens. Networks Syst.*, pp. 13–22, 2006.
- [7] B. A. Correa, L. Ospina, and R. C. Hincapié, “Survey of clustering techniques for mobile ad hoc

- networks,” *Rev. Fac.*, pp. 145–161, 2007.
- [8] S. Céspedes, A. a. Cárdenas, and T. Iwao, “Comparison of data forwarding mechanisms for AMI networks,” *2012 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. ISGT 2012*, pp. 1–8, 2012.
- [9] N. Devroye, M. Vu, and V. Tarokh, “Cognitive radio networks,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 25, no. 6, pp. 12–23, 2008.
- [10] a. M. C. So and Y. Ye, “On solving coverage problems in a wireless sensor network using voronoi diagrams,” *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 3828 LNCS, pp. 584–593, 2005.
- [11] G. V. Arévalo, R. C. Hincapié, and J. E. Sierra, “Optimization model for UDWDM-PON deployment based on physical restrictions and asymmetric user’s clustering,” in *Proc. SPIE 9626, Optical Systems Design 2015: Optical Design and Engineering VI*, 2015, vol. 9626, pp. 1–11.
- [12] G. Barai and K. Raahemifar, “Optimization of distributed communication architectures in advanced metering infrastructure of smart grid,” in *Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2014 IEEE 27th Canadian Conference on*, 2014, pp. 1–6.
- [13] M. G. H. Omran, A. P. Engelbrecht, and A. Salman, “An overview of clustering methods,” *Intell. Data Anal.*, vol. 11, no. 6, pp. 583–605, Sep. 2007.

- [14] X. Li, W. Peng-Jun, and O. Frieder, "Coverage in wireless ad hoc sensor networks," *IEEE Trans. Comput.*, vol. 52, no. 6, pp. 753–763, 2003.
- [15] P. Gupta and P. R. Kumar, "The capacity of wireless networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 46, no. 2, pp. 388–404, 2000.
- [16] X. Yu, W. Huang, J. Lan, and X. Qian, "A Novel Virtual Force Approach for Node Deployment in Wireless Sensor Network," *2012 IEEE 8th Int. Conf. Distrib. Comput. Sens. Syst.*, no. 2011, pp. 359–363, 2012.
- [17] P. Kumari and Y. Singh, "Delaunay triangulation coverage strategy for wireless sensor networks," in *2012 International Conference on Computer Communication and Informatics*, 2012, no. November, pp. 1–5.
- [18] M. Jin, G. Rong, H. Wu, L. Shuai, and X. Guo, "Optimal surface deployment problem in wireless sensor networks," *Proc. - IEEE INFOCOM*, pp. 2345–2353, 2012.
- [19] 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.
- [20] M. a. M. Viera, L. F. M. Viera, L. B. Ruiz, A. a. F. Loureiro, A. O. Fernandes, and J. M. S. Nogueira, "Scheduling nodes in wireless sensor networks: a Voronoi

- approach,” in *28th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks, 2003. LCN '03. Proceedings.*, 2003, no. October 2015.
- [21] E. Inga, G. Arevalo, and R. Hincapié, “Optimal deployment of cellular networks for Advanced Measurement Infrastructure in Smart Grid,” in *2014 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing, COLCOM 2014 - Conference Proceedings*, 2014, pp. 1–6.
- [22] J. Brown and J. Y. Khan, “Key performance aspects of an LTE FDD based Smart Grid communications network,” *Comput. Commun.*, vol. 36, no. 5, pp. 551–561, 2013.
- [23] A. Peralta-Sevilla, E. Inga, R. Cumbal, and R. Hincapié, “Optimum Deployment of FiWi Networks using Wireless Sensors based on Universal Data Aggregation Points,” in *IEEE Colombian Conference on Communications and Computing*, 2015, pp. 1–6.
- [24] N. M. Manousakis, G. N. Korres, and P. S. Georgilakis, “Taxonomy of PMU placement methodologies,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 2, pp. 1070–1077, 2012.