

Proposal to improve the design of the network of smart meters in a university campus

Angel Kamt Marconi¹, Jonatán Rojas Polo, Mg.¹, Alessandro Gilardino Arias¹, Alexia Cáceres Cansaya¹
¹Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, angel.kamt@pucp.edu.pe, jrojas@pucp.pe, agilardino@pucp.pe

Abstract– This research was developed within the geographical area of the campus of the “Pontificia Universidad Católica del Perú” (PUCP, Lima-PE), and deals with the design and centers once electricity and water distribution networks within the campus buildings and pavilions academic. The data (measurements) were collected on the main servers, taking into account the communication capacity of each device, the available communication channels, and meeting their respective restrictions of range, zone limitation, among others. The objective is to design an optimal route of the data of each point, searching for the minimization of the costs implementation’s. The research began with the identification of the measurement requirement (number of meters of each type) in each of the 54 buildings (pavilions) and the distance (location) of each point within the campus. A description of the available communication devices and technologies is made, with an emphasis on their cost specifications, range ranges and data repeatability. Once the routes, quantities of devices required and restrictions were presented, the optimum route of the data and the quantity and type of communication devices required at each point were determined using the AMPL software. A comparison was made between this result and the non-optimized one, they achieve significant savings with the optimization model.

Keywords- Energy metering, Water metering, Smart grid.

Digital Object Identifier (DOI):<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2018.1.1.5>
ISBN: 978-0-9993443-1-6
ISSN: 2414-6390

Propuesta de mejora del diseño de la red de medidores inteligentes en un campus universitario

Angel Kamt Marconi¹, Jonatán Rojas Polo, Mg.¹, Alessandro Gilardino Arias¹, Alexia Cáceres Cansaya¹
¹Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, angel.kamt@pucp.edu.pe, jrojas@pucp.pe, agilardino@pucp.pe

Resumen– Esta investigación se desarrolló dentro del área de un campus universitario (Lima – Perú), y aborda el diseño y distribución de una red de medidores inteligentes de energía eléctrica y agua dentro de los edificios y pabellones del campus. Los datos (mediciones) fueron recolectados en los servidores principales, teniendo en cuenta la capacidad de comunicación de cada dispositivo, los canales de comunicación disponibles, las restricciones del rango de cobertura, la limitación de zonas, entre otros. El objetivo es diseñar una ruta óptima de los datos de cada punto, buscando la minimización de los costos de implementación. En la primera fase se identificó el requerimiento de medición en cada tipo de medidor, así también se tomó en cuenta cada uno de los 54 pabellones y la distancia entre ellos. Posteriormente se realizó una descripción de los dispositivos y tecnologías de comunicación disponibles, haciendo énfasis en sus especificaciones de costos, rangos de alcance y capacidad de repetición de datos. Luego se desarrolló un modelo de optimización matemática e hicimos uso del software AMPL para obtener la ruta óptima de los datos, y la cantidad de cada tipo de dispositivos de comunicación requeridos en cada punto. Finalmente se realizó una comparación entre este resultado de la modelación matemática y el valor no optimizado, logrando obtener un ahorro significativo con el uso de un modelo de optimización.

Palabras claves- medición de energía, medición de agua, redes inteligentes.

Abstract– This research took place inside an area of the university campus (Lima – Perú). It's about the design and distribution of intelligent electric power and water consumption meters for the buildings and blocks of the campus. The data (measurements) was collected and later stored in the main servers; taking into account each device's communication range, the available communication channels, covered area restrictions, zone delimitation, among others. The objective is the design of an optimal data route for each point with a minimal implementation cost. In the first step the measurement requirement for each type of meter was identified considering the whole 54 blocks and the distance between them. After that we described the devices and communication technologies available focusing on their cost, reach and data repetition capacity specifications. Then we developed a mathematical optimization model solved with the AMPL software in order to obtain the optimal data route and the amount of each type of communication device required for each point. Finally, a comparison between the mathematical model solution and the unoptimized value was made showing a significant decrease in costs with the use of the mathematical model.

Keywords- Energy metering, water metering, Smart grid.

I. INTRODUCCIÓN

El campus universitario en estudio, se ubica en el distrito de San Miguel, en la ciudad de Lima, Perú, tiene un área

aproximada de 413,902 m² [1], dentro del cual se albergan facultades académicas, oficinas administrativas, oficinas de docentes, cafeterías, entre otros. Actualmente dentro de un marco de conciencia medioambiental y preocupación por el cambio climático, la Universidad está promoviendo políticas de ahorro energético, agua, papel, clasificación de desperdicios y otras conductas que permitan la reducción del impacto medioambiental. Dentro de este marco, la universidad en estudio busca obtener la certificación LEED (acrónimo de Leadership in Energy & Environmental Design) para sus edificios [2].

La certificación LEED fue desarrollada por el Consejo de la Construcción Verde de Estados Unidos (US Green Building Council) con el fin de validar la incorporación de ciertas normas de eficiencia energética, uso de energías alternativas, calidad ambiental interior, eficiencia del consumo de agua, desarrollo sostenible de espacios exteriores y la selección adecuada de materiales.

Dentro de las normas LEED para eficiencia energética y de uso del agua [3], la prioridad es la medición de ambas magnitudes de manera distribuida y descentralizada. Esto significa, la medición de la energía eléctrica para diferentes cargas dentro de un edificio (alumbrado, tomacorrientes, ascensores, bombas contra incendio, aire acondicionado, otras cargas); y la medición del consumo de agua para los servicios.

La información medida en cada punto debe ser recolectada, procesada y comparada con otras variables, como el número de usuarios (alumnos, profesores, trabajadores), horarios de clase o eventos especiales. La comparación permite verificar cuán eficiente es el uso de ambos recursos, dado que se contará con un gran número de dispositivos de medición, además, se requiere interconectarlos de una manera que permita recibir la información de manera automática hacia un centro de recolección de datos.

Por lo general una red de medidores se implementa haciendo uso de medios de comunicación libres y no licenciados, lo cual permite que los costos operativos tiendan a ser nulos. Las tecnologías más empleadas para estos casos son la tecnología de radiofrecuencia (RF) o la tecnología de transmisión de datos por la línea eléctrica (Power Line Communications o PLC). El uso de una u otra tecnología (o ambas) dependerá mucho del terreno y ubicación particular de cada punto de medición.

El costo de cada punto de medición varía según el tipo de tecnología de comunicación que se usa. Por temas de robustez y confiabilidad de una red, ésta se suele implementar

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2018.1.1.5>
ISBN: 978-0-9993443-1-6
ISSN: 2414-6390

empleando ambos tipos de comunicación en todos sus medidores, a pesar de no siempre sean usados. Esto evidencia la necesidad de emplear herramientas de ingeniería para optimizar el uso de estos dispositivos, de manera que disminuyan los costos de materiales del proyecto.

II. SITUACIÓN INICIAL

A continuación, se describe el terreno y la extensión de la red de medidores, el requerimiento de medidores para los diferentes pabellones, además se describen detalladamente las características de las tecnologías a emplear y se muestran las diferentes condiciones de trabajo para cada punto de análisis.

Descripción del terreno:

El campus universitario de esta investigación cuenta con aproximadamente 390,000 m² habilitados, donde se ubican 53 pabellones de interés para la medición. Adicionalmente, está una infraestructura adicional que se encuentra a 150 metros del campus principal, la cual es usado como un instituto de idiomas. Estas edificaciones se encuentran identificadas y enumeradas en la figura 1. Cada edificio o pabellón cuenta con diferentes cantidades de aulas, oficinas u otros servicios. Esto hace que el requerimiento de medidores varíe de acuerdo a cada tipo de necesidad. Las cantidades de medidores de cada tipo se encuentran detalladas en la tabla I. Tanto en la figura 1 como la tabla I se identifican zonas (delimitadas con diferentes colores). Estas zonas están determinadas por el propio sistema eléctrico del campus universitario, el cual está dividido en 10 subestaciones de distribución internas (más la del centro de idiomas, punto N°54). La delimitación de estas zonas es relevante para identificación de ciertas restricciones que posteriormente se expondrán.

Tecnologías de medición y comunicación:

Existen cuatro tipos de dispositivo en la red: medidor de energía, medidor de agua, repetidor de datos y concentrador. Todos tienen la capacidad de comunicación dentro de la red, pero cumplen diferentes funciones que a continuación se describen:

a) Medidor de Energía

Descripción. - Dispositivo que mide el consumo de energía eléctrica del lugar donde se encuentra instalado, ya sea aula, laboratorio, oficinas, edificio, etc. La medición tiene unidades de kWh pero equivalen a un volumen de datos en Bytes.

Comunicación. - Cada medidor puede tener 2 tipos de comunicación: radiofrecuencia (RF), que emplea señales electromagnéticas que viajan por el aire; o línea eléctrica (PLC), que emplea el mismo cableado de energía para transmitir información. Tiene la capacidad de actuar como repetidor de datos de hasta un máximo de 5 dispositivos.

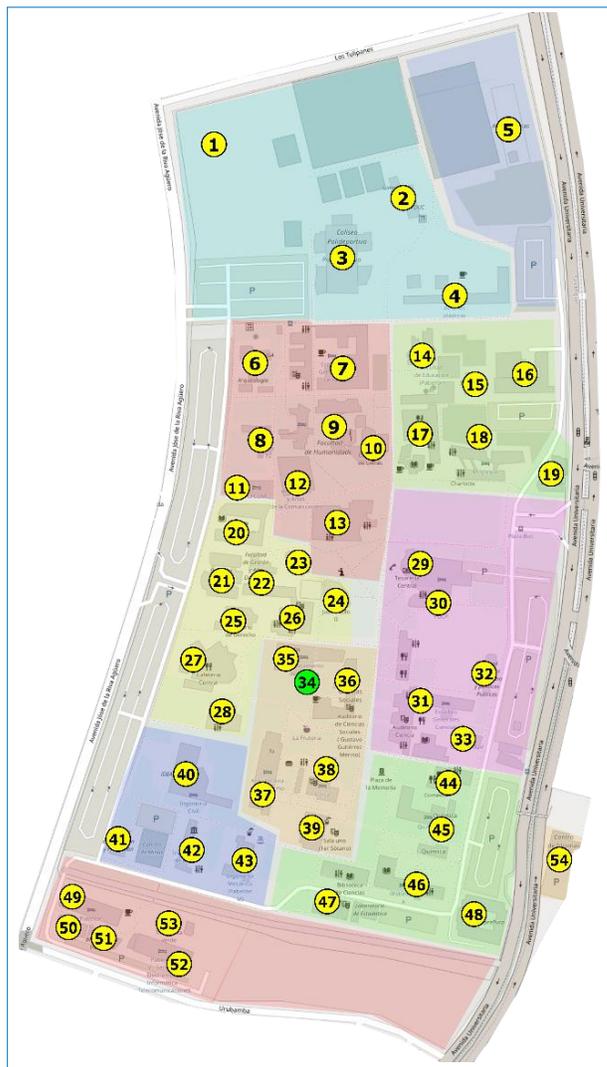


Fig. 1 Distribución de pabellones dentro del campus universitario.

b) Medidor de Agua

Descripción. - Dispositivo que mide el consumo de agua del lugar donde se encuentra instalado, ya sea baños, edificios, etc. La medición tiene unidades de m³, no obstante, equivalen a un volumen de datos en Bytes.

Comunicación. - Dado que no hay presencia de cableado eléctrico de energía, un medidor electrónico de agua funciona con baterías y únicamente se comunica vía radiofrecuencia (RF), la cual emplea señales electromagnéticas que viajan por el aire hasta el receptor. Este sistema de comunicación, dado que emplea una batería, requiere tener un consumo mínimo de energía. Es por eso que su velocidad de transmisión de datos y su rango de alcance es inferior al de otros dispositivos, además, este dispositivo no tiene capacidad de repetidor.

Tabla I
Principales zonas del campus universitario

Nodo	Zona	Pabellón	Cantidad medidores energía	Cantidad medidores agua
1	1	Instituto de Radioastronomía	2	1
2	1	Gimnasio/CEMDUC	4	3
3	1	Coliseo Polideportivo	3	4
4	1	Facultad de Artes Plásticas	3	4
5	2	Artes Escénicas	2	3
6	3	Arqueología	3	1
7	3	Estudios Generales Letras	2	8
8	3	Estudio de TV	2	1
9	3	Facultad de Humanidades	2	6
10	3	Cafetería de Letras	2	1
11	3	TUC	2	1
12	3	Facultad de Ciencias y Artes de la Comunicación	3	6
13	3	Biblioteca Central	3	3
14	4	Facultad de Educación	2	4
15	4	Sala Cuna	2	1
16	4	Maestría	2	1
17	4	Patio de Comidas (Tinkuy)	3	1
18	4	Complejo McGregor	9	30
19	4	Admisión	2	1
20	5	Pabellón Z	3	6
21	5	Pabellón H	3	4
22	5	Facultad de Gestión y Alta Dirección	2	4
23	5	Teología	2	2
24	5	Auditorio Juan Pablo II	2	1
25	5	Auditorio de Derecho	2	1
26	5	Facultad de Derecho	3	6
27	5	Cafetería Central	2	1
28	5	Sección Matemáticas	2	1
29	6	Tesorería Central/Rectorado	2	3
30	6	Centro Médico PUCP	2	1
31	6	Estudios Generales Ciencias	2	8
32	6	Facultad de Gobierno y Políticas Públicas	2	2
33	6	Contabilidad	2	2
34	7	DIRINFO (Centro de recolección de datos)	2	1
35	7	Departamento de Ciencias Sociales	3	2
36	7	Ciencias Sociales	2	6
37	7	Arquitectura y Urbanismo	3	4
38	7	Física	3	2
39	7	Biblioteca de Ciencias/Sala Uno	9	10
40	8	Ingeniería Civil	6	4
41	8	Instituto de Corrosión y Protección	4	1
42	8	Ingeniería de Minas	4	6
43	8	Ingeniería Mecánica	9	6
44	9	Comedor de Administrativas	2	1
45	9	Química	4	2
46	9	Pabellón A	16	14
47	9	Laboratorios de Hidráulica y Estadística	6	1
48	9	CEPREPUCP	2	4
49	10	Pabellón O	7	8
50	10	CETAM	4	2
51	10	Sección Ing. Industrial	2	2
52	10	Pabellón V	6	6
53	10	Tiendecita Verde	2	1
54	11	Idiomas Católica Pueblo Libre	4	8
TOTAL			184	213

c) Repetidor de Datos

Descripción. - Dispositivo que recibe las señales de otros dispositivos y las retransmite, posibilitando un mayor alcance entre el emisor y el receptor final.

Comunicación. - Cada repetidor puede tener 2 tipos de comunicación: radiofrecuencia (RF), que emplea señales electromagnéticas que viajan por el aire; o línea eléctrica (PLC), que emplea el mismo cableado de energía para

transmitir información, además, tiene la capacidad de actuar como repetidor de datos de hasta un máximo de 5 dispositivos.

d) Concentrador o centro de recolección de datos

Descripción. - Servidor con la capacidad de recibir la información de miles de medidores y manejarla en bases de datos. Esto permite administrar y gestionar la información posteriormente y es de especial interés para el usuario final.

Comunicación. - Puede recibir información vía RF o PLC, y tiene la capacidad de recibir conexiones de hasta un máximo de 5 dispositivos a la vez.

Para la investigación nos centramos en los costos de los equipos y de otros datos relevantes para el diseño de la red, estos datos se observan en la Tabla II.

Tabla II
Costos y especificaciones de los medidores y equipos de comunicación

Tipo de dispositivo	Costo de dispositivo (\$/unidad)	Medios de comunicación	Costo de dispositivo de comunicación (\$/unidad)	Costo fijo de instalación (\$)	Distancia máxima de cobertura (m)	Capacidad máxima dispositivos que permite recibir para repetición (unidad)
Medidor Energía	200	RF	70	50	200	5
		PLC	50		150	
Medidor	100	RF	90	30	100	0

Las características relevantes para el diseño de la red se resumen a continuación:

- Un nodo de la red (medidor de energía o agua) solo puede transmitir por un único medio a la vez, RF o PLC según su capacidad.
- Un nodo o repetidor nunca transmitirá datos a más de un punto a la vez.
- Un nodo o repetidor solo puede admitir la entrada de datos vía RF o PLC de máximo 5 dispositivos.
- Únicamente el centro de recolección de datos se considera como un nodo que solo recibe datos, no envía.

III. PROPUESTA DE MEJORA

A continuación, se describe la metodología que se propuso para optimizar el problema:

Identificación y cálculo de cantidades:

Dado que solo los medidores de energía pueden actuar como repetidores de hasta 5 conexiones simultáneas, se puede calcular la cantidad de conexiones máximas disponibles en cada nodo del campus, tomando en cuenta que además cada pabellón cuenta con medidores de agua que solo transmitirán su data propia. Los cálculos se muestran en la tabla III.

Simplificación de la red:

En la tabla II se detallan las limitaciones de distancia para ambos tipos de comunicación. La distancia máxima por RF está

medida entre nodo y nodo en línea recta, mientras que la distancia por PLC está medida a lo largo de todo el cableado eléctrico que recorre desde un nodo hasta el otro, es por ello que éste puede presentar una mayor longitud en comparación con la distancia euclidiana entre un nodo y otro.

Tabla III
Transmisión de dispositivos

Nodo	Cantidad medidores energía	Cantidad medidores agua	Zona	Número máximo de dispositivos de entrada	Número disponible de dispositivos de entrada
1	2	1	1	10	8
2	4	3	1	20	14
3	3	4	1	15	9
4	3	4	1	15	9
5	2	3	2	10	6
6	3	1	3	15	12
7	2	8	3	10	1
8	2	1	3	10	8
9	2	6	3	10	3
10	2	1	3	10	8
11	2	1	3	10	8
12	3	6	3	15	7
13	3	3	3	15	10
14	2	4	4	10	5
15	2	1	4	10	8
16	2	1	4	10	8
17	3	1	4	15	12
18	9	30	4	45	7
19	2	1	4	10	8
20	3	6	5	15	7
21	3	4	5	15	9
22	2	4	5	10	5
23	2	2	5	10	7
24	2	1	5	10	8
25	2	1	5	10	8
26	3	6	5	15	7
27	2	1	5	10	8
28	2	1	5	10	8
29	2	3	6	10	6
30	2	1	6	10	8
31	2	8	6	10	1
32	2	2	6	10	7
33	2	2	6	10	7
34	2	1	7	10	8
35	3	2	7	15	11
36	2	6	7	10	3
37	3	4	7	15	9
38	3	2	7	15	11
39	9	10	7	45	27
40	6	4	8	30	21
41	4	1	8	20	16
42	4	6	8	20	11
43	9	6	8	45	31
44	2	1	9	10	8
45	4	2	9	20	15
46	16	14	9	80	51
47	6	1	9	30	24
48	2	4	9	10	5
49	7	8	10	35	21
50	4	2	10	20	15
TOTAL	184	213			

Luego de conocer las capacidades y limitaciones de cada tipo de comunicación, procedemos a identificar las siguientes reglas y restricciones para el diseño de la red:

- La comunicación PLC sólo es válida dentro de un mismo sistema eléctrico. Las zonas identificadas en la figura 1 y tabla I representan al sistema eléctrico independiente de esa región sombreada, como se mencionó anteriormente. Esto genera la primera regla: La comunicación PLC sólo es válida entre nodos de una misma zona.
- La comunicación RF no tiene restricción por zona, únicamente por distancia entre punto y punto. Por esta razón, solo se podrá atravesar de una zona a otra vía RF.
- En base a estas características, además se proponen las siguientes supuestos:
 - Se considera que todos los medidores de energía y agua dentro de un pabellón transmiten su data, ya sea directamente o mediante retransmisiones hacia un medidor único. Por esta razón, se considera un pabellón como un único punto de transmisión (o retransmisión) de datos, a pesar de tener en varios casos más de un medidor/repetidor.
 - No se considera la restricción de distancia máxima dentro de un mismo pabellón, dado que las distancias son más cortas que el rango de alcance de los dispositivos.

De acuerdo a los planos del campus universitario, se pudieron obtener las distancias entre los diferentes nodos, y las distancias aproximadas del tendido eléctrico dentro de las diferentes zonas. Con ayuda de la herramienta Excel se elaboró dos matrices, DY y DW, con una dimensión de 54x54 (la cantidad de nodos al cuadrado), cuyos valores son de 1s y 0s según la restricción de distancia máxima de cada tipo de comunicación (RF y PLC) para cada nodo.

Se cumple que:

***Si:** Distancia (línea recta) entre nodo i y nodo j ≤ Distancia máxima RF*

Entonces: $DY_{ij} = 1$

***De lo contrario:** $DY_{ij} = 0$*

también se cumple:

***Si:** Distancia (cableada) entre nodo i y nodo j ≤ Distancia máxima PLC*

Entonces: $DW_{ij} = 1$

***De lo contrario:** $DW_{ij} = 0$*

Ambas *matrices D* ayudan a simplificar el modelo lineal entero, ya que ayudan a eliminar aquellas rutas consideradas imposibles dentro de un escenario real, lo cual se empleará en el modelo matemático propuesto.

Identificación de restricciones:

Se procede a elaborar las restricciones a tomarse en cuenta para la elaboración del modelo [4, 5, 6, 7]. La restricción (1) determina la cantidad mínima de dispositivos (RF o PLC) necesarios en cada nodo de la red. Esto depende de la cantidad de medidores de energía requeridos en cada pabellón (ver tabla I). La restricción (2) determina la cantidad mínima de dispositivos RF en cada pabellón. Esto se debe a la presencia de medidores de agua, que, como se mencionó anteriormente, poseen sólo comunicación RF y sin capacidad de repetición.

Las restricciones (3) y (4) delimitan la cantidad máxima de conexiones de entrada E_i para cada nodo (este valor variará según la cantidad de medidores de energía y agua en cada nodo); y la cantidad obligatoria de conexiones de salida. Este valor será típicamente 1 para todos los nodos (ya que todos deben transmitir su data), excepto para el **número 34** que es el centro de recolección, en cuyo caso $S_{34} = 0$.

Las restricciones (5a) y (5b) aseguran la dependencia entre la existencia de una ruta de datos (RF o PLC) y la existencia de su respectivo dispositivo. Es decir, basta que exista al menos una ruta RF (entrada o salida), y este dispositivo deberá comprarse. Lo mismo ocurrirá para PLC (5b).

Así también las restricciones (6a) indican el flujo de datos que ingresa a un nodo, más su dato propio (1 unidad), lo cual equivale al flujo de datos de salida; (6b) a excepción del nodo **número 34** que corresponde al centro de recolección de datos. En este caso todo el flujo de entrada debe equivaler al total de nodos menos uno ($54 - 1 = 53$). Las siguientes restricciones (7) y (8) evitan que haya flujo de datos en ambos sentidos entre dos nodos, y la posibilidad de que un nodo se transmita a sí mismo, respectivamente. Finalmente, se modela una restricción de dependencia (9) entre las variables de decisión Y_{ij} y W_{ij} y la existencia de flujo de datos X_{ij} .

Optimización:

Se desarrolla un modelo matemático en AMPL, donde la función objetivo es la minimización de los costos de dispositivos de comunicación (Z):

$$\text{minimizar } Z = \sum_{i=1}^{N_P} C_{RF} N_{RFi} + \sum_{i=1}^{N_P} C_{PLC} N_{PLCi}$$

Donde las variables de la función objetivo son:

- N_{RFi} = cantidad (entera) de dispositivos RF en el nodo i
- N_{PLCi} = cantidad (entera) de dispositivos PLC en el nodo i
- C_{RF} = costo de un dispositivo RF
- C_{PLC} = costo de un dispositivo PLC
- NP = número total de nodos en la red = 54

Sujeto a:

$$N_{RFi} + N_{PLCi} \geq a_i \quad \forall i \in V \quad (1)$$

$$N_{RFi} \geq b_i \quad \forall i \in V \quad (2)$$

$$\sum_j^{N_P} (D_{Yij} Y_{ij} + D_{Wij} W_{ij}) \leq E_i \quad \forall i \in V \quad (3)$$

$$\sum_j^{N_P} (D_{Yij} Y_{ij} + D_{Wij} W_{ij}) = S_i \quad \forall i \in V, i \neq 34 \quad (4)$$

$$M \cdot N_{RFi} \geq \sum_j^{N_P} (D_{Yij} Y_{ij} + D_{Yji} Y_{ji}) \quad \forall i \in V \quad (5a)$$

$$M \cdot N_{PLCi} \geq \sum_j^{N_P} (D_{Wij} W_{ij} + D_{Wji} W_{ji}) \quad \forall i \in V \quad (5b)$$

$$1 + \sum_{j=1}^{N_P} X_{ji} = \sum_{j=1}^{N_P} X_{ij} \quad \forall i \in V, i \neq 34 \quad (6a)$$

$$\sum_{j=1}^{N_P} X_{ji} = N_P - 1 \quad \forall i \in V, i \neq 34 \quad (6b)$$

$$D_{Yij} Y_{ij} + D_{Yji} Y_{ji} + D_{Wij} W_{ij} + D_{Wji} W_{ji} \leq 1 \quad \forall i \in V, \forall j \in V \quad (7)$$

$$Y_{ii} + W_{ii} = 0 \quad \forall i \in V \quad (8)$$

$$M(Y_{ij} + W_{ij}) \geq X_{ij} \quad \forall i \in V, \forall j \in V \quad (9)$$

Donde las variables de las restricciones objetivo son:

- N_{RFi} = cantidad (entera) de dispositivos RF en el nodo i .
- N_{PLCi} = cantidad (entera) de dispositivos PLC en el nodo i .
- a_i = cantidad de medidores de energía en el nodo i
- b_i = cantidad mínima de dispositivos RF requeridos en el nodo i (dependerá de la cantidad de medidores de agua).
- Y_{ij} = variable de decisión que determina si existe una ruta de datos vía RF desde el nodo i hasta el nodo j .
- W_{ij} = variable de decisión que determina si existe una ruta de datos vía PLC desde el nodo i hasta el nodo j .
- DY_{ij} = matriz de 1s y 0s que determina la existencia de las variables Y_{ij} según

el resultado de la simplificación previa.

DW_{ij} = matriz de 1s y 0s que determina la existencia de las variables W_{ij} según el resultado de la simplificación previa.

E_i = cantidad máxima de dispositivos de entrada admitidos en el nodo i .

S_i = cantidad de conexiones de salida admitidos y obligatorias en el nodo i .

M = constante auxiliar de penalización (1000).

X_{ij} = cantidad de datos (entera) transmitidos desde el nodo i hasta el nodo j .

V = {1..NP}

NP = 54

IV. RESULTADOS

La programación en APML produjo la ruta de datos mostrada en la figura 2 y en la tabla IV.

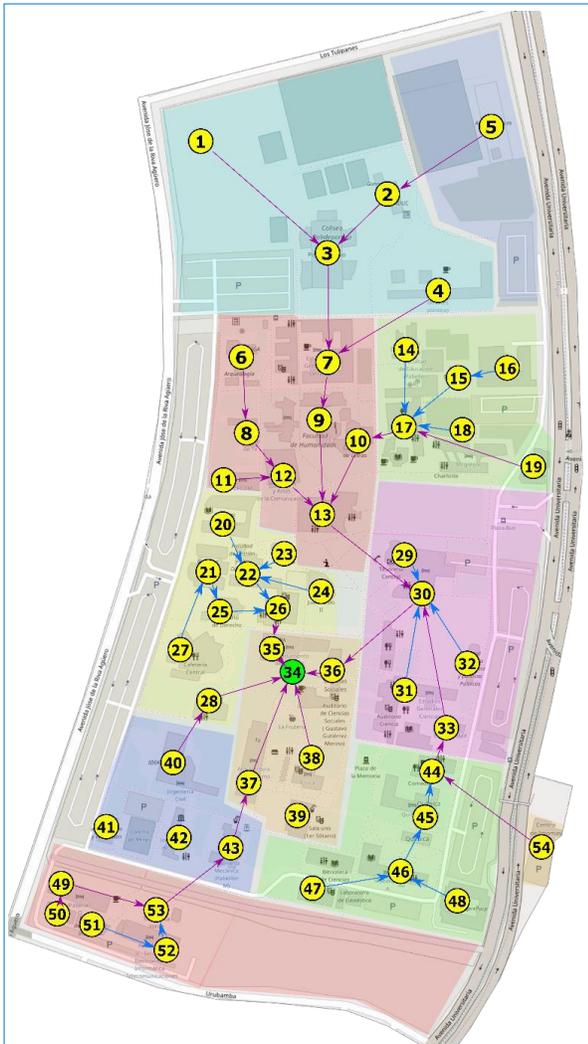


Fig. 2 Distribución de pabellones/edificios en el terreno de la PUCP.

Arcos de color Morado: Ruta vía RF

Arcos de color Azul: Ruta vía PLC.

Tabla IV
Contabilización de rutas generadas

Nodo	Rutas de datos				Usa RF	Usa PLC
	Entradas		Salidas			
	RF (Y)	PLC (W)	RF (Y)	PLC (W)		
1	0	0	1	0	Si	No
2	1	0	0	1	Si	Si
3	1	1	1	0	Si	Si
4	0	0	1	0	Si	No
5	0	0	1	0	Si	No
6	0	0	1	0	Si	No
7	2	0	1	0	Si	No
8	1	0	1	0	Si	No
9	1	0	1	0	Si	No
10	1	0	1	0	Si	No
11	0	0	1	0	Si	No
12	2	0	1	0	Si	No
13	3	0	1	0	Si	No
14	0	0	0	1	No	Si
15	0	1	0	1	No	Si
16	0	0	0	1	No	Si
17	1	3	1	0	Si	Si
18	0	0	0	1	No	Si
19	0	0	1	0	Si	No
20	0	0	0	1	No	Si
21	0	1	0	1	No	Si
22	0	3	0	1	No	Si
23	0	0	0	1	No	Si
24	0	0	0	1	No	Si
25	0	1	0	1	No	Si
26	0	2	1	0	Si	Si
27	0	0	0	1	No	Si
28	1	0	1	0	Si	No
29	0	0	0	1	No	Si
30	2	3	1	0	Si	Si
31	0	0	0	1	No	Si
32	0	0	0	1	No	Si
33	1	0	1	0	Si	No
34	5	0	0	0	Si	No
35	1	0	1	0	Si	No
36	1	0	1	0	Si	No
37	1	0	1	0	Si	No
38	1	0	1	0	Si	No
39	0	0	1	0	Si	No
40	0	2	1	0	Si	Si
41	0	0	0	1	No	Si
42	0	0	0	1	No	Si
43	1	0	1	0	Si	No
44	1	1	1	0	Si	Si
45	0	1	0	1	No	Si
46	0	2	0	1	No	Si
47	0	0	0	1	No	Si
48	0	0	0	1	No	Si
49	1	0	1	0	Si	No
50	0	0	1	0	Si	No
51	0	0	0	1	No	Si
52	0	1	0	1	No	Si
53	1	1	1	0	Si	Si
54	0	0	1	0	Si	No

La tabla IV muestra el conteo de las rutas generadas para cada tipo, y la determinación de comprar o no el módulo RF o PLC (o ambos) para cada medidor principal de cada nodo. Tomando en cuenta que, además, cada nodo cuenta con otros tipos de medidor, el resultado final de las cantidades a adquirir se muestra en la tabla V.

Tabla V

Cantidades totales a adquirir de cada tipo de módulo de comunicación

Nodo	Cantidad medidores energía	Cantidad medidores agua	Módulos RF mínimos	Módulos RF en medidor principal	Módulos PLC en medidor principal	Total Módulos RF	Total Módulos PLC
1	2	1	1	1	0	2	0
2	4	3	1	1	0	4	0
3	3	4	1	1	0	3	0
4	3	4	1	1	0	3	0
5	2	3	1	1	0	2	0
6	3	1	1	1	0	3	0
7	2	8	2	1	0	2	0
8	2	1	1	1	0	2	0
9	2	6	2	1	0	2	0
10	2	1	1	1	0	2	0
11	2	1	1	1	0	2	0
12	3	6	2	1	0	3	0
13	3	3	1	1	0	3	0
14	2	4	1	0	1	2	1
15	2	1	1	0	1	2	1
16	2	1	1	0	1	2	1
17	3	1	1	1	1	3	1
18	9	30	7	0	1	9	1
19	2	1	1	1	0	2	0
20	3	6	2	0	1	3	1
21	3	4	1	0	1	3	1
22	2	4	1	0	1	2	1
23	2	2	1	0	1	2	1
24	2	1	1	0	1	2	1
25	2	1	1	0	1	2	1
26	3	6	2	1	1	3	1
27	2	1	1	0	1	2	1
28	2	1	1	1	0	2	0
29	2	3	1	0	1	2	1
30	2	1	1	1	1	2	1
31	2	8	2	0	1	2	1
32	2	2	1	0	1	2	1
33	2	2	1	1	0	2	0
34	2	1	1	1	0	2	0
35	3	2	1	1	0	3	0
36	2	6	2	1	0	2	0
37	3	4	1	1	0	3	0
38	3	2	1	1	0	3	0
39	9	10	3	1	0	3	6
40	6	4	1	1	1	1	6
41	4	1	1	0	1	4	1
42	4	6	2	0	1	4	1
43	9	6	2	1	0	2	7
44	2	1	1	1	1	2	1
45	4	2	1	0	1	4	1
46	16	14	3	0	1	3	14
47	6	1	1	0	1	1	6
48	2	4	1	0	1	2	1
49	7	8	2	1	0	2	5
50	4	2	1	1	0	4	0
51	2	2	1	0	1	2	1
52	6	6	2	0	1	6	1
53	2	1	1	1	1	2	1
54	4	8	2	1	0	4	0
Totale	184	213	76	32	28	143	69

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La ruta de datos obtenida genera una cantidad de dispositivos óptima (mínima requerida) para satisfacer las necesidades funcionales de la red a un costo total (min Z) de \$13,460.00 en dispositivos de comunicación, respecto a un total de \$22,080.00 que corresponden a la versión completa de los medidores (todos con RF y PLC a la vez). Esto genera un ahorro en equipos de \$8,620.00.

Tabla VI

Comparación de costos, Optimizado vs. No Optimizado

Resultado de Optimización			
	Cantidad	Costo Unitario (\$)	Costo Total (\$)
Módulos	143	70.00	10,010.00
Módulos	69	50.00	3,450.00
TOTAL	212		13,460.00
Comparación de costos, No Optimizado			
	Cantidad	Costo Unitario (\$)	Costo Total (\$)
Módulos	184	70.00	12,880.00
Módulos	184	50.00	9,200.00
TOTAL	368		22,080.00
Ahorro (\$)			8,620.00

La propuesta de una ruta óptima para una red de medidores inteligentes está basada en el uso real y eficiente de cada medio de comunicación, asumiendo que existen muchos casos en donde alguno de ellos “*se desperdicia*” al nunca emplearse. En la presente investigación no se han tomado en cuenta otros criterios de diseño de redes como el tiempo de transmisión de datos de cada salto o repetición que aumenta el tiempo de llegada de un dato desde un punto inicial hasta el centro de datos, tampoco aborda la redundancia de repetición que asegura por lo menos 2 ó 3 rutas de salida para los datos de un nodo, o la presencia de más de dos centros recolectores, en cuyo caso existirían 3 casos a evaluar: en presencia de ambos, o de alguno de ellos.

Se considera continuar la presente investigación expandiendo el número de nodos y las restricciones geográficas, tomando en cuenta la presencia de paredes y árboles que pueden afectar el desempeño de la comunicación por radiofrecuencia. Asimismo, se tomará en consideración la implementación del control del alumbrado público interno del campus, con lo cual se añade la cualidad de comunicación en dos vías para algunos nodos.

REFERENCIAS

- [1] Pontificia Universidad Católica del Perú. 95 cosas que debes saber de la PUCP. Consulta: 09 de junio de 2018. <http://puntoedu.pucp.edu.pe/noticias/95-cosas-que-debes-saber-de-la-pucp/>
- [2] U.S. Green Building Council, 2016, Leadership in Energy and Environmental Design (LEED). Consulta: 09 de diciembre de 2016. <http://www.usgbc.org/leed>
- [3] Pontificia Universidad Católica del Perú, 2016, Edificio de aulas de la PUCP recibe certificación LEED. Consulta: 08 de junio de 2016. <http://www.pucp.edu.pe/climadecambios/index.php?tmpl=articulo&id=1871>

- [4] Hillier, F., Lieberman, G. (2015). Introducción a la Investigación de operaciones. Décima edición. México D.F.:McGraw-Hill.
- [5] WINSTON, Wayne (2005). Investigación de operaciones: aplicaciones y algoritmos. Cuarta edición. México. Thomson.
- [6] BAZARAA, Mohktar; John JARVIS y Hanif Serali (2010). Linear Programming and network flows. Fourth Edition. Wiley, Hoboken, New Jersey.
- [7] EPPEN, Gary; F.J. Gould, C.P. Schmidt, Jeffrey H. Moore y Larry R. Weatherford. (2000). Investigación de operaciones en la ciencia administrativa. Quinta edición. México: Prentice Hall.

ANEXOS

Código AMPL

```

set Nodos := 1..54;
set Matriz := {Nodos,Nodos};

param costo_rf := 70;
param costo_plc := 50;
param Mat_W {Matriz};
param Mat_Y {Matriz};
param M := 1000;
param S {Nodos};
param E {Nodos};
param a {Nodos};
param b {Nodos};

var x_rf {Nodos} integer >=0;
var x_plc {Nodos} integer >=0;
var R {Nodos} integer >=0;
var P {Nodos} integer >=0;
var Y {Matriz} binary;
var W {Matriz} binary;
var X {Matriz} integer >=0;

#Funcion objetivo
minimize Costos:
    sum {i in Nodos} (costo_rf * x_rf[i] + costo_plc * x_plc[i]);

#Restricciones
#Cantidad minima
subject to Cant_min {i in Nodos} :
    x_rf[i] + x_plc[i] >= a[i];

subject to Cant_min_rf {i in Nodos} :
    x_rf[i] >= b[i];

#entradas maximas
subject to ent_max {j in Nodos}:
    sum {i in Nodos} (Mat_Y[i,j] * Y[i,j] + Mat_W[i,j] * W[i,j]) <= E[j];

#salidas
subject to salida {i in Nodos}:
    sum {j in Nodos} (Mat_Y[i,j] * Y[i,j] + Mat_W[i,j] * W[i,j]) = S[i];

#Variables auxiliares R
subject to var_auxR {i in Nodos}:
    sum {j in Nodos} Mat_Y[i,j] * (Y[i,j] + Y[j,i]) = R[i];

#Variables auxiliares P
subject to var_auxP {i in Nodos}:
    sum {j in Nodos} Mat_W[i,j] * (W[i,j] + W[j,i]) = P[i];

#valor dependencia 1
subject to dep_1 {i in Nodos}:
    M * x_rf[i] >= sum {j in Nodos} (Mat_Y[i,j] * Y[i,j] + Mat_Y[j,i] * Y[j,i]);

#valor dependencia 2
subject to dep_2 {i in Nodos}:
    M * x_plc[i] >= sum {j in Nodos} (Mat_W[i,j] * W[i,j] + Mat_W[j,i] * W[j,i]);

#datos de salida
subject to R1 {i in Nodos: i<>34}:
    1 + sum {j in Nodos} X[j,i] = sum {j in Nodos} X[i,j];

subject to R2:
    sum {j in Nodos} X[j,34] = card(Nodos) -1;

subject to R3 {(i,j) in Matriz}:
    Y[i,j] + Y[j,i] + W[i,j] + W[j,i] <= 1;

subject to R4 {i in Nodos, j in Nodos: i=j}:
    Y[i,j] + W[i,j] = 0;

subject to R5 {(i,j) in Matriz}:
    M * (Y[i,j] + W[i,j]) >= X[i,j] ;

```