

**“OPTIMIZING RESOURCE AND RESTORATION SCHEDULING FOR
POWER DISTRIBUTION SYSTEMS AFTER A NATURAL
HAZARD: A CASE STUDY WITH VOLCANIC LAHARS”**

**ARTÍCULO ACADÉMICO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

**AUTORES: LLUMIGUSIN CACHIPUZ GRACE ALEXANDRA
YÁNEZ CHANCUSIG JHONATAN ALEXANDER**

**DIRECTOR: ING. ORTIZ VILLALBA, DIEGO EDMUNDO MSc
LATACUNGA 2022**



CONTENIDO:

1. MOTIVACIÓN
2. METODOLOGÍA
3. MODELO DE OPTIMIZACIÓN
4. CASOS DE ESTUDIOS Y RESULTADOS
5. CONCLUSIONES



MOTIVACIÓN

Los peligros naturales que ocurren a nivel mundial representan una gran amenaza para los servicios públicos y la sociedad en general.



ESTADOS UNIDOS

El 78% de las interrupciones en el servicio eléctrico son causadas por desastres naturales. [1]

COSTA RICA (VOLCAN IRAZÚ)

Perdidas que alcanzaron los 605,5 Millones de dólares debido al impacto en sus servicios básicos.

[2]



Costos sociales y económicos considerables



¿Qué se puede hacer al respecto?



- Resiliencia en sistemas eléctricos
- Uso de herramientas para una eficaz toma de decisiones



Terremoto Manabí 2016



Aluvión Quito (La Gasca) 2022

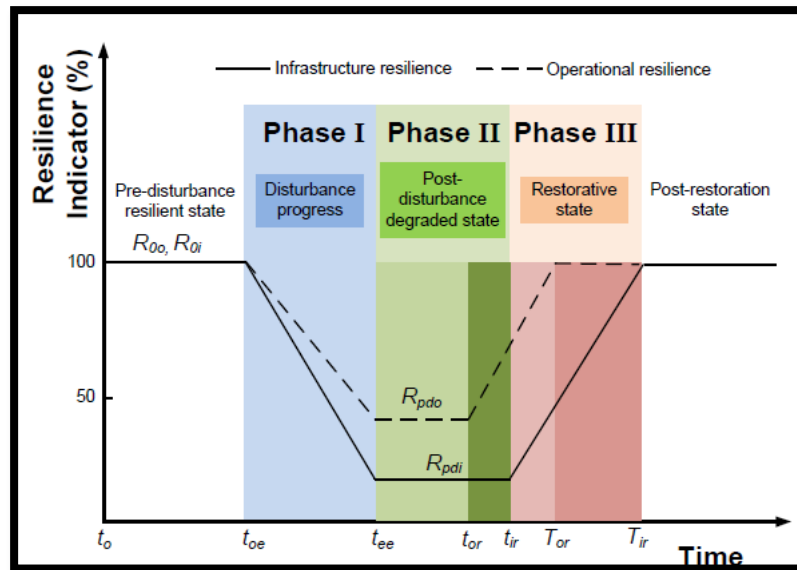


- Falla en cascada de sistemas críticos
- Suministro de energía a cargas críticas (hospitales, refugios de emergencia, entre otros)



RESILIENCIA

La resiliencia en el contexto energético describe la capacidad de la red eléctrica para soportar y recuperarse de un evento de alto impacto y baja probabilidad que comprometa su integridad y buen funcionamiento [3].



Métricas de resiliencia [4]

RESTAURACIÓN

- Alimentar las cargas críticas
- Optimización de recursos

RESILIENCIA

- Eventos de alto impacto y baja probabilidad (desastres naturales)



EVENTOS HILP

- TERREMOTOS
- HURACANES
- INCENDIOS FORESTALES

ESTUDIOS ACTUALES SOBRE RESILIENCIA (RESTAURACIÓN DEL SISTEMA)



- Restauración del sistema mediante la reconfiguración de la red y el uso de generación distribuida [5].
- Uso de reconectores para el aislamiento de las fallas y la restauración [6].
- Planificación del sistema [7].

PRINCIPALES CONTRIBUCIONES DEL ARTÍCULO

Modelo de flujo de potencia óptimo (DC-OPF) implementado en un escenario de erupción volcánica.

Una estrategia para mejorar la utilización y distribución de los recursos de la empresa.

Una aplicación del método en el mundo real en los alimentadores de san rafael y salcedo en cotopaxi (ecuador).





Datos de Entrada

Escenario de contingencia, recursos de la compañía de distribución y datos del sistema de distribución de energía.



- ESCENARIO DE CONTINGENCIA RECURSOS DISPONIBLES EN LA EMPRESA DE DISTRIBUCIÓN.
- DATOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE DISTRIBUCIÓN



Optimización MILP

Optimization de recursos

Programación de la restauración en la operación en el Sistema de Distribución de energía



- MODELO OPTIMIZACIÓN
- DC-OPF



Datos de Salida

Evaluación de la programación de distribución de recursos y restauración.



- UBICACIÓN ÓPTIMA DE RECURSOS Y CUADRILLAS EN EL PDS.





Representación del sistema

El sistema se expresa mediante la teoría de grafos.



TEORÍA DE GRAFOS

DONDE: $G=(V,E)$
V ES UN CONJUNTO DE VÉRTICES
E ES UN CONJUNTO DE ARISTAS

Escenario en tiempo real

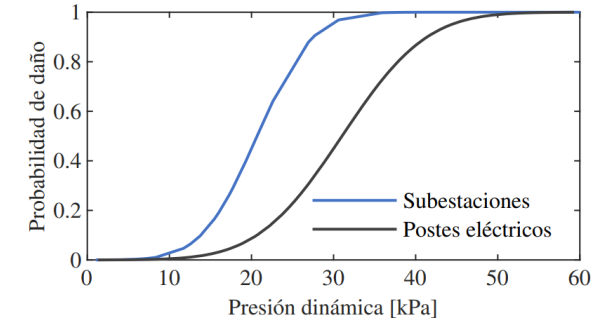
Evaluar datos de elementos afectados del sistema en ese instante.

Sistema georreferencial

- Considerando tiempo de llegada y tiempos de salida de los recursos.
- Ubicación de depósitos en el sistema
- Cantidad de recursos disponibles

Escenario Históricos

Curvas de vulnerabilidad representan el estado de daño de los elementos del sistema de distribución (postes de hormigón, S/E) con la para evaluar el impacto del evento eruptivo.



Mediante una matriz de indisponibilidad se identifiquen los nodos y líneas de distribución. Que se encuentran afectados.





La formulación presenta un problema de optimización lineal de enteros Mixtos (MILP) para determinar el costo de operación y ubicación óptima de los recursos de la empresa de distribución eléctrica.

Función Objetivo

$$\text{Min}_{OF} = OC$$

$$\text{Min}_{OF} = OC_{ENS} + OC_{MG} + OC_{RESOURCE} \quad (1)$$

$$OC_{ENS} = \sum_{i=1}^{NB} \sum_{t=1}^T C_i^{ENS} ENS_{i,t} \quad (2)$$

$$OC_{MG} = \sum_{i=1}^{N_{MG}} [C^{fuel} f_{i,t}^{fuel} + C^{CO_2} E_{i,t}^{CO_2}] \quad (3)$$

$$OC_{Resource} = \sum_{i=1}^{NB} \sum_{w=1}^{NR} \sum_{t=1}^T C^{RM} (\lambda_{i,w,t} + \tau_{i,w,t}) d_i \quad (4)$$

$$d_i = D_i + (1 - \sigma_i)M \quad (5)$$



PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN MILP (Formulación Matemática)

El modelo de generación térmica utilizado para representar los generadores móviles los cuales son utilizados durante la contingencia, considerando también por cuestiones ambientales las emisiones de CO₂ asociadas al funcionamiento de las unidades generadoras.

MODELO DE GENERACIÓN TÉRMICA

$$Consumo_{Diesel} = \frac{Potencia_{GT}}{\mu * \varepsilon} \quad (6)$$

μ : Poder calorífico de combustible (Kwh/kg)

ε : eficiencia energética

EMISIONES DE CO₂

$$Emisiones_{CO_2} = K_i * \mu * Consumo_{Diesel} \quad (7)$$

K_i : Factor de emisiones de CO₂ (Ton/Kwh)

$$0 \leq P_{i,t}^{MG} \leq \sum_{w=1}^{N_{MG}} P_w^{MG,max} \chi_{i,w,t} \quad (8)$$





PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN MILP (Formulación Matemática)

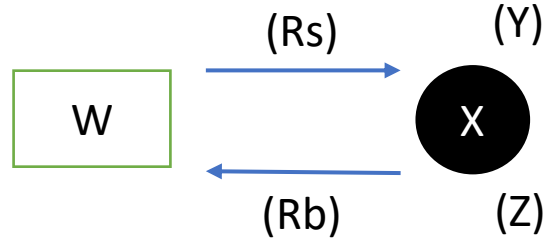
MOVILIZACIÓN DE RECURSOS

Por medio de las siguientes ecuaciones se representa la movilización de los recursos disponibles desde el deposito hacia el nodo y viceversa.

Expresión Lógica

$$\lambda_{i,w,t} - \tau_{i,w,t} = \chi_{i,w,t} - \chi_{i,w,t-1} \quad (9)$$

$$\lambda_{i,w,t} + \tau_{i,w,t} \leq 1 \quad (10)$$



$$\sum_{i=1}^{NB} [v_{i,w,t} - \rho_{i,w,t}] = v_{w,t} - v_{w,t-1} \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^{NB} [v_{i,w,t} - \rho_{i,w,t}] \leq 1 \quad (12)$$

$$\chi_{i,w,t} + v_{w,t} \leq 1 \quad (13)$$





PROBLEMA DE OPTIMIZACION MILP (Formulación Matemática)

TIEMPO DE LLEGADA DE LOS RECURSOS AL NODO

Las restricciones permiten identificar en que momento los recursos o cuadrillas es decir el tiempo de llegada de los recursos al nodo.

$$\sum_{t=1}^{T_i^{RM}} \lambda_{i,w,t} = 0 \quad (14)$$

$$\rho_{i,w,t} = \lambda_{i,w,t} + T_i^{RM} - 1 \quad (15)$$

$$\tau_{i,w,t} = v_{i,w,t} + T_i^{RM} - 1 \quad (16)$$

$$\sum_{k=t}^T (1 - \lambda_{i,w,k} - \rho_{i,w,t}) \geq 0 \quad (17)$$

$$\sum_{k=t}^T (1 - v_{i,w,k} - \tau_{i,w,t}) \geq 0 \quad (18)$$





PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN MILP (Formulación Matemática)

TIEMPO DE LLEGADA DE LOS RECURSOS AL DEPÓSITO

Las restricciones permiten identificar en que momento los recursos o cuadrillas es decir el tiempo de retirada del recurso y se dirige al deposito para reabastecerse.

$$\sum_{k=t}^{t+T_w^D-1} v_{w,k} \geq T_w^D \sum_{i=1}^{NB} v_{i,w,t} \quad (19)$$

$$\sum_{k=t}^{T_w^D} (v_{w,k} - \sum_{i=1}^{NB} v_{i,w,t}) \geq 0 \quad (20)$$

$$\sum_{k=t}^{t+T_i^R-1} \chi_{i,w,k} \geq T_i^R \lambda_{i,w,t} \quad (21)$$

$$\sum_{k=t}^{T_i^R} (\chi_{i,w,k} - \sum_{i=1}^{NB} \lambda_{i,w,t}) \geq 0 \quad (22)$$





RESTAURACIÓN DE LÍNEAS Y NODOS

Por medio de las siguientes restricciones se establece la recuperación de nodos y líneas que estuvieron interrumpidas. Las cuales posteriormente serán restituidas y se colocan en funcionamiento normal.

$$\sum_{w=1}^{N_R} \tau_{i,w,t} \leq 1 \quad (23)$$

$$\psi_{i,t} = \sum_{k=1}^{t \dots |T|} \sum_{w=1}^{N_R} \tau_{i,w,k} \quad (24)$$

$$\gamma_{ij,t} \leq \psi_{i,t} \quad (25)$$

$$\gamma_{ij,t} \leq \psi_{j,t} \quad (26)$$

$$\gamma_{ij,t} \leq \psi_{i,t} + \psi_{j,t} - 1 \quad (27)$$





Ecuación de Balance

$$P_{i,t}^{Grid} + P_{i,t}^{MG} + \sum_{ij \in \Omega_{LT}} P_{ij,t}^{line} + ENS_{i,t} = D_i$$

(28) Asegura el equilibrio generación demanda en cada nodo del sistema.

$$0 \leq ENS_{i,t} \leq D_i$$

(29) Condición que permita que la ENS en cada nodo no exceda la demanda conectada a la barra.

$$-\gamma_{ij,t} P_{line}^{max} \leq P_{ij,t}^{line} \leq P_{line}^{max} \gamma_{ij,t}$$

(30) Establece los limites de capacidad de las L/T.

$$-M(1 - \gamma_{ij,t}) + \frac{\delta_{i,t} - \delta_{j,t}}{x_{ij}} \leq P_{ij,t}^{line} \leq \frac{\delta_{i,t} - \delta_{j,t}}{x_{ij}} + M(1 - \gamma_{ij,t})$$

(31) Asocian como se desacoplan los ángulos de tensión de las barras asociadas a las líneas que se desconectan por una contingencia en el sistema.

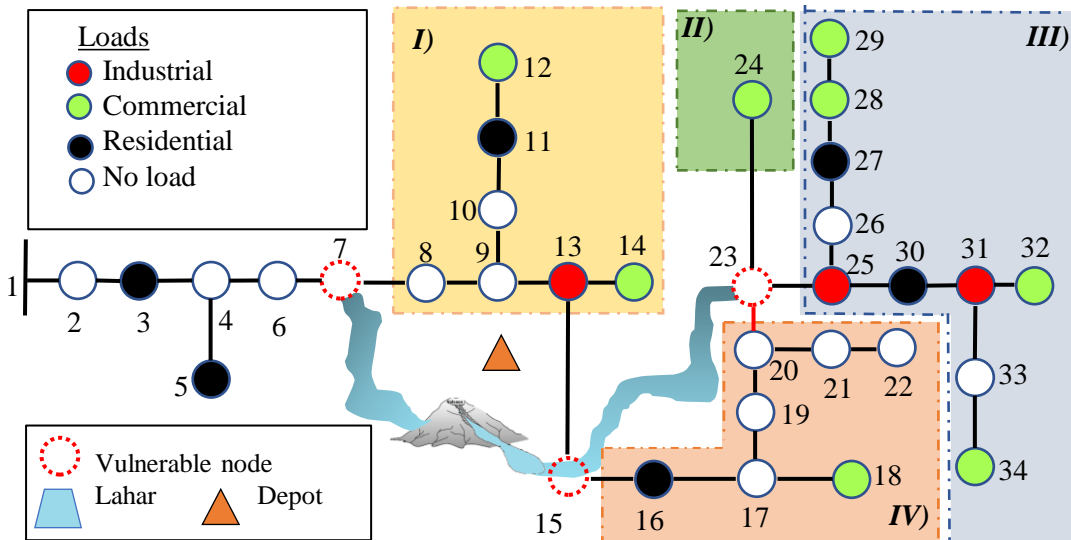




CASOS DE ESTUDIO (SISTEMA DE PRUEBA)

SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICO

IEEE 34 NODES TEST FEEDER



RECURSOS DISPONIBLES DE LA EMPRESA DE DISTRIBUCIÓN

Generación Térmica

Número de Generadores: 2
Capacidades de Generación

G1(KW)	100
G2(KW)	500
Poder calorífico (KWh/kg)	11,8
C_GT(USD/Kg)	0,485882353
k(TON/kwh)	0,00026136
Costo CO2(USD/TON)	52,79
Eficiencia	0,30

Cuadrillas

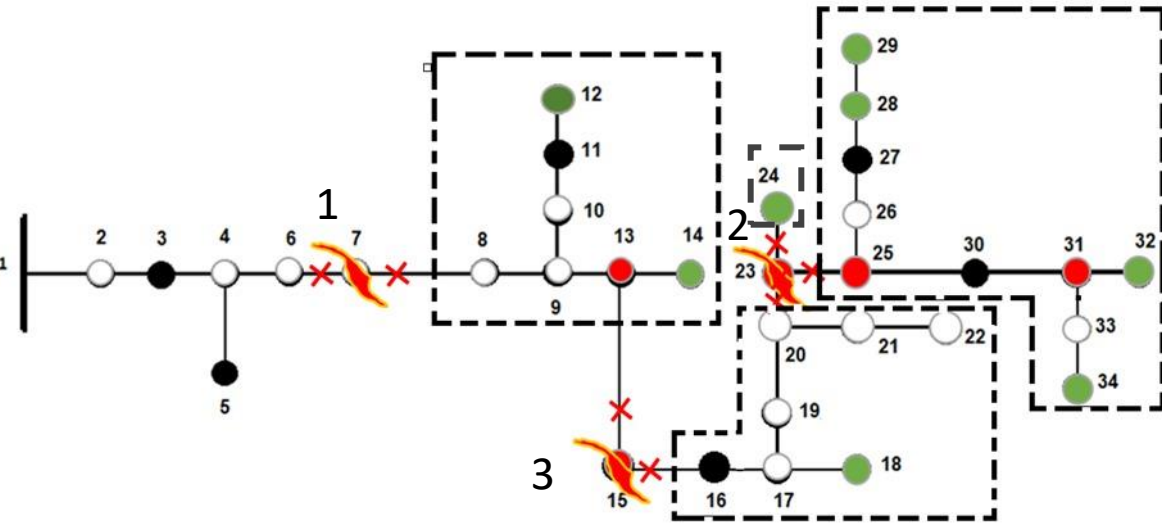
- Número de cuadrillas: 2
- Tiempo de funcionamiento de la cuadrilla: 6 horas
- Tiempo que la cuadrilla se mantiene en el depósito: 1 hora
- Costo de Movilización: 0,3 USD/km

Tiempo horizonte de evaluación:
48 horas

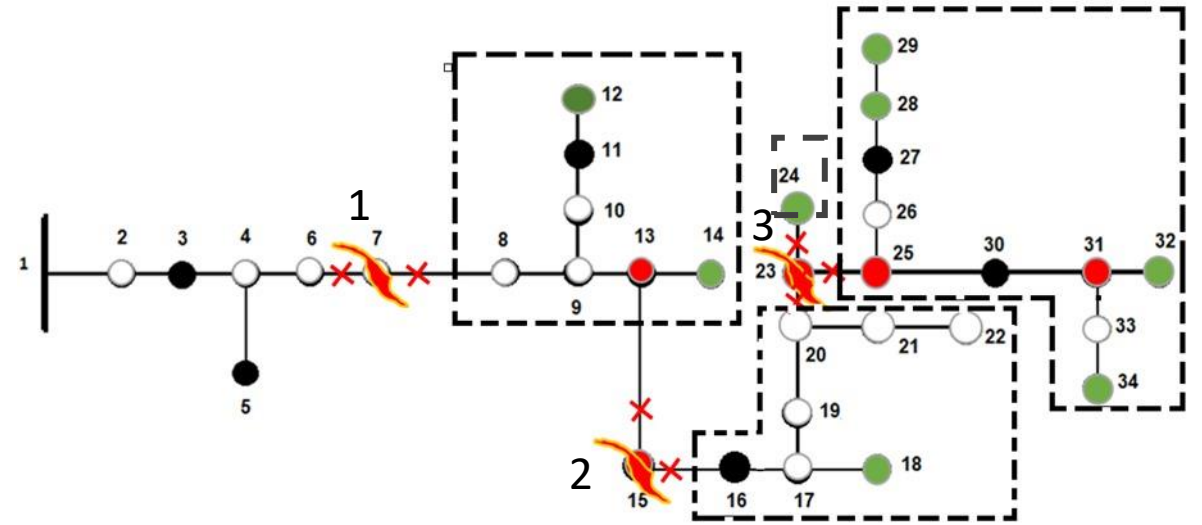




Modelo Óptimo



Modelo Experto

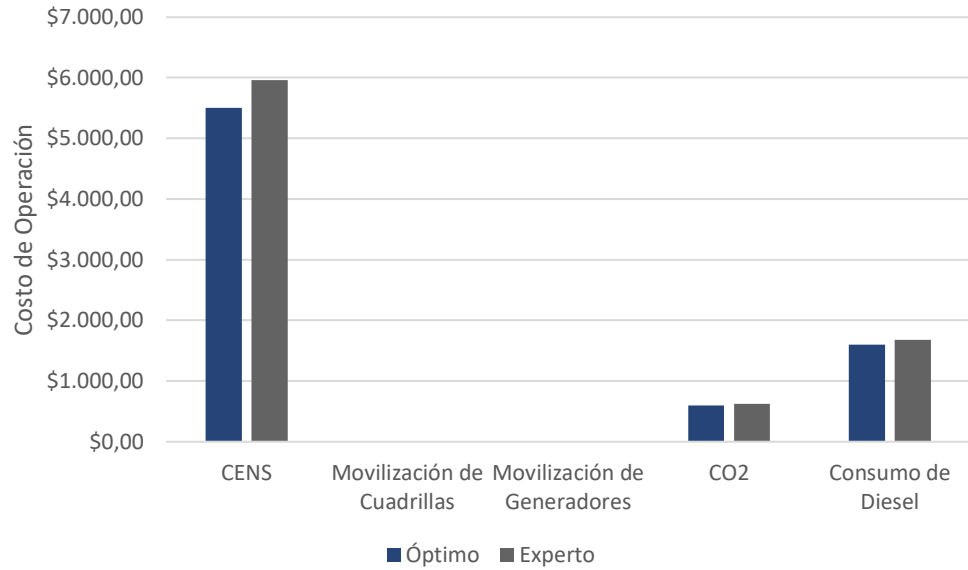


Caso	G1		G2		C1		C2	
	Nodo	Tiempo	Nodo	Tiempo	Nodo	Tiempo	Nodo	Tiempo
Optimo	13	3-11	25	3-48	7	2-11	23	6-15
	25	15-48	-	-	15	15-24	-	-
Experto	13	3-11	25	3-48	7	2-11	15	4-13
	25	15-48	-	-	23	18-27	-	-



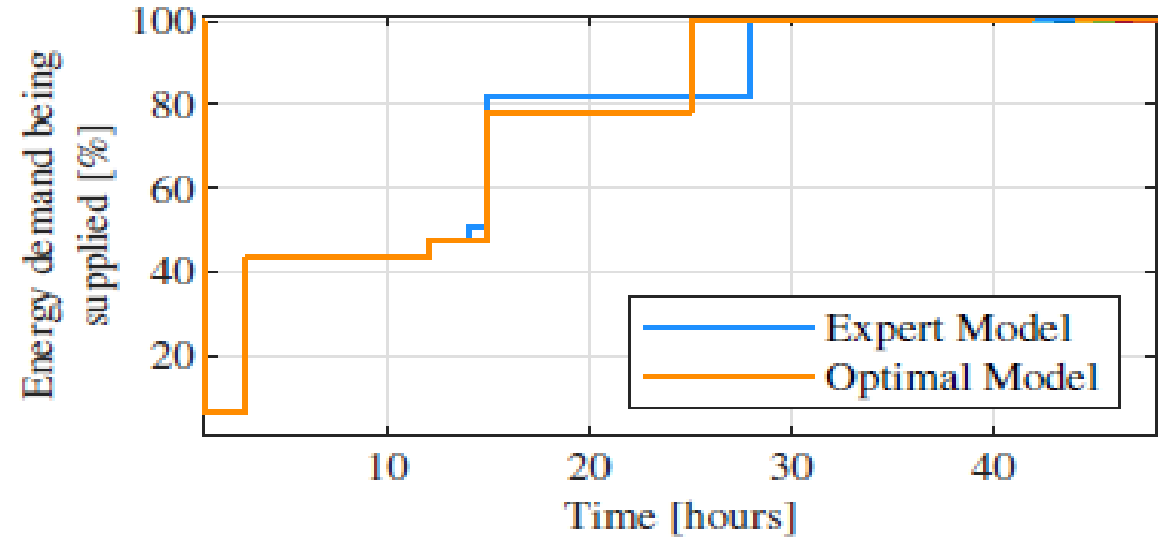


RESULTADOS (SISTEMA DE PRUEBA)



CO= 8.962,70USD **Modelo Óptimo**
 CO= 9.349,37 USD **Modelo Experto**

Diferencia CO
 \$386,68



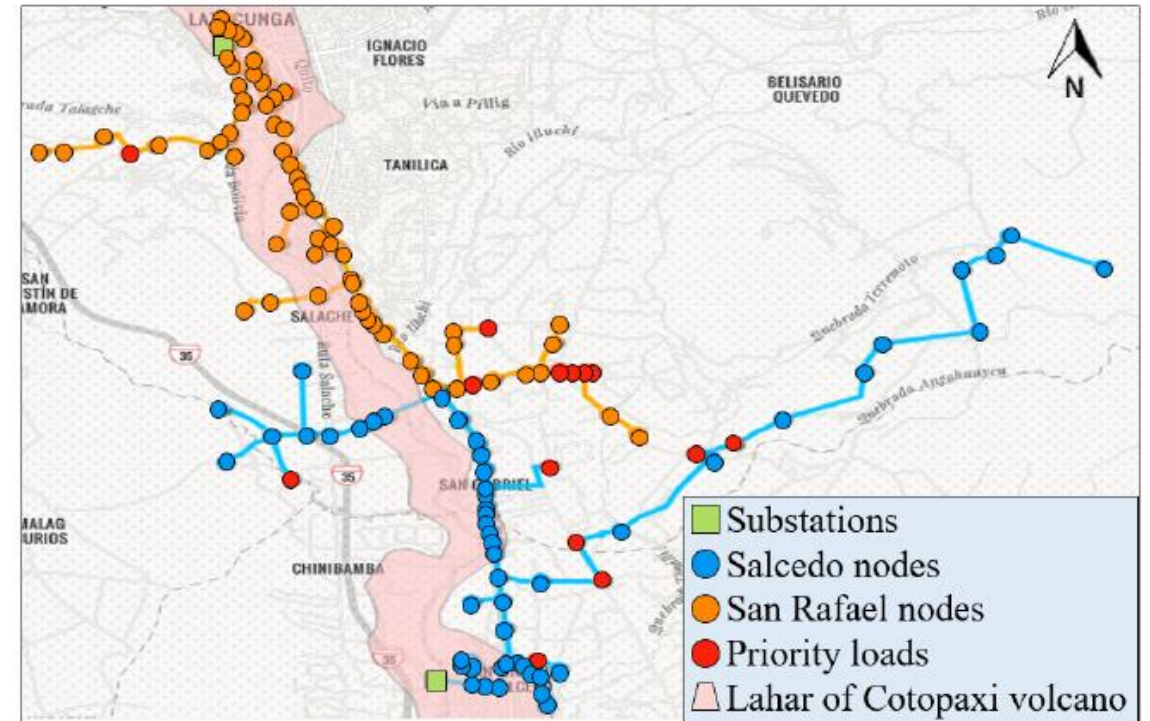
Caso	ENS [MWh]	EIU_I [%]	EIU_C [%]	EIU_R [%]	Resiliencia operativa $\pi - cargas$ [kW/h]	Resiliencia infraestructura $\pi - nodos$ [nodos/h]
Optimo	17,34	14.56	23	34.5	6.05	0.12
Experto	17.54	17.51	26	34.5	5.41	0.11





CONSIDERACIONES

- Los datos requeridos para modelar los alimentadores de san Rafael y Salcedo se obtuvieron del geoportal de la empresa Elepco disponible en [8].
- Las cargas críticas (hospitales, centros comunitarios de salud, refugios de emergencia, industrias) se identificaron de acuerdo con el mapa de peligrosidad del volcán Cotopaxi de la secretaría nacional de gestión de riesgos disponible en [9].
- Para caracterizar los lahares del volcán cotopaxi, se utilizaron datos de velocidad y densidad obtenidos de modelos basados en la erupción histórica de 1877 [10].



Alimentadores San Rafael y Salcedo (impacto del lahar)

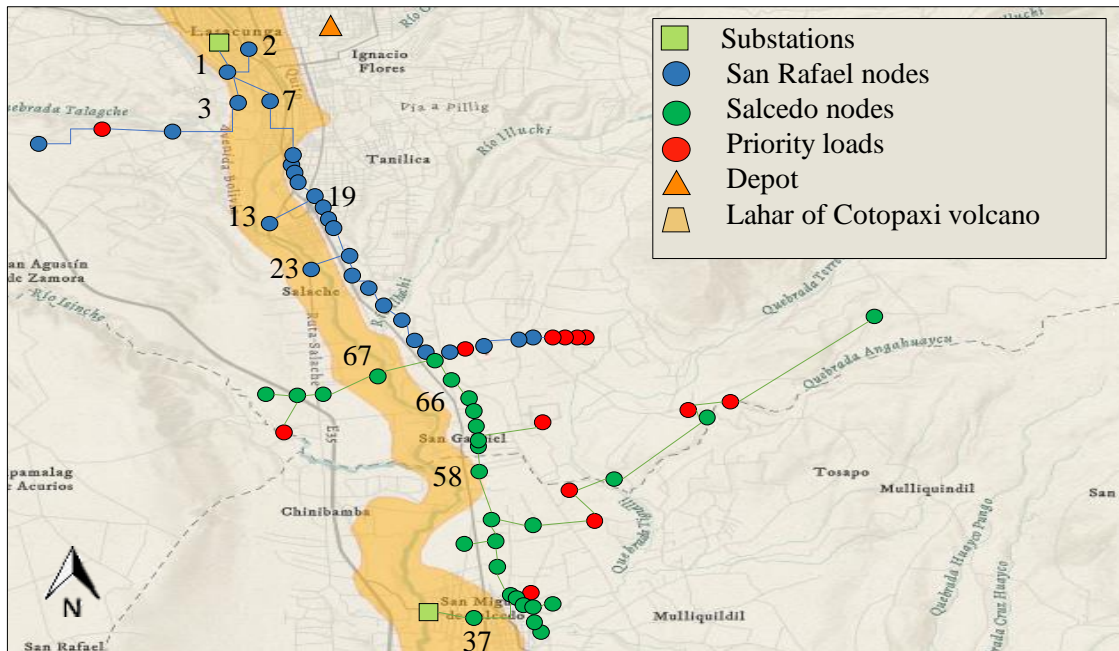




CASOS DE ESTUDIO (SISTEMA REAL)

SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICO

DIAGRAMA UNIFILAR DE LOS ALIMENTADORES DE SAN RAFAEL Y SALCEDO



Generación Térmica

Número de Generadores: 1
Capacidades de Generación

G1(KW)	5000
Poder calorifico (KWh/kg)	11,8
C_GT(USD/Kg)	0,485882353
k(TON/kwh)	0,00026136
Costo CO2(USD/TON)	52,79
Eficiencia	0,30

Cuadrillas

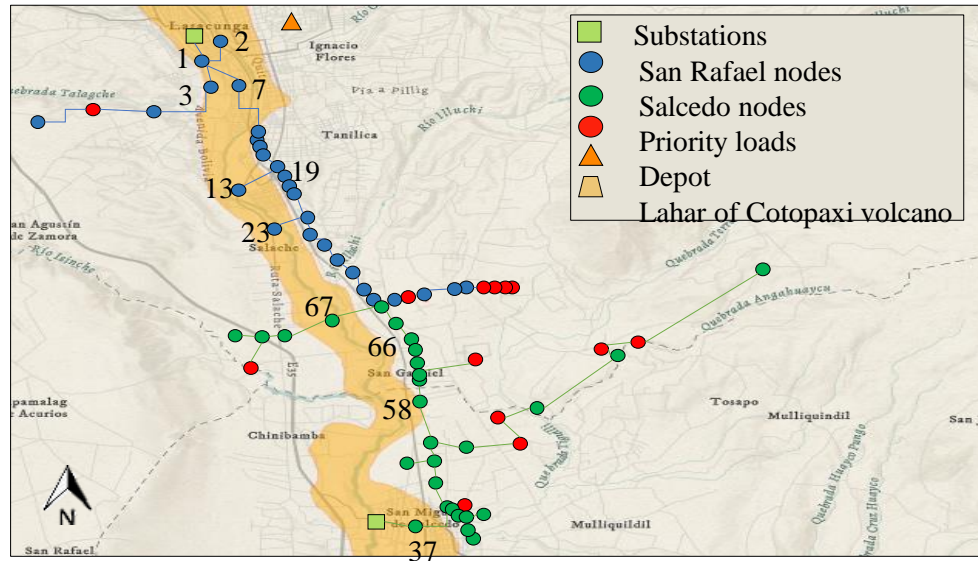
- Número de cuadrillas: 5
- Tiempo de funcionamiento de la cuadrilla: 6 horas
- Tiempo que la cuadrilla se mantiene en el depósito: 1 hora
- Costo de Movilización: 0,3 USD/km

Tiempo horizonte de evaluación:
144 horas

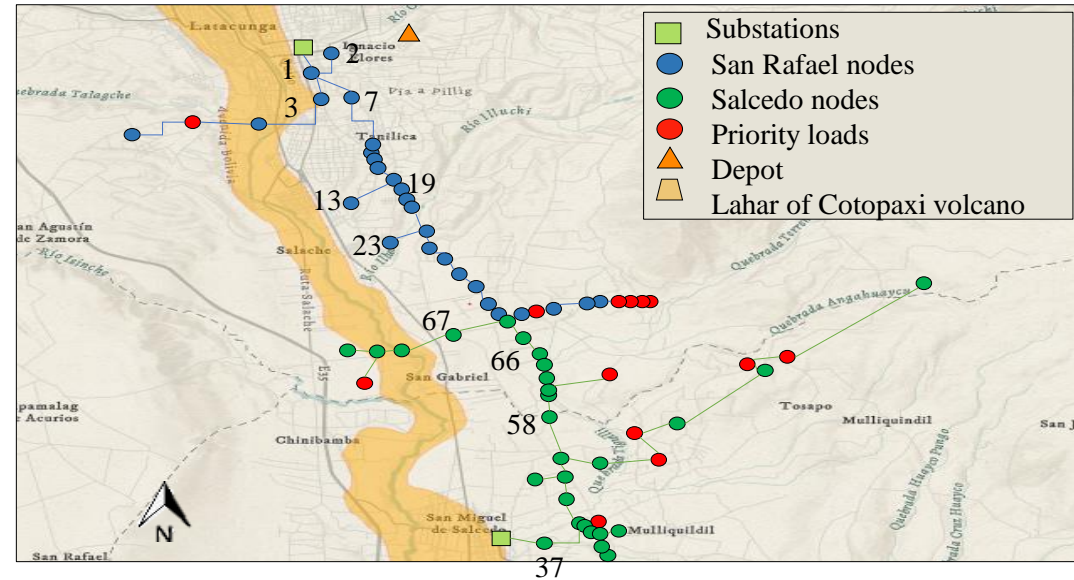




Modelo Óptimo



Modelo Experto

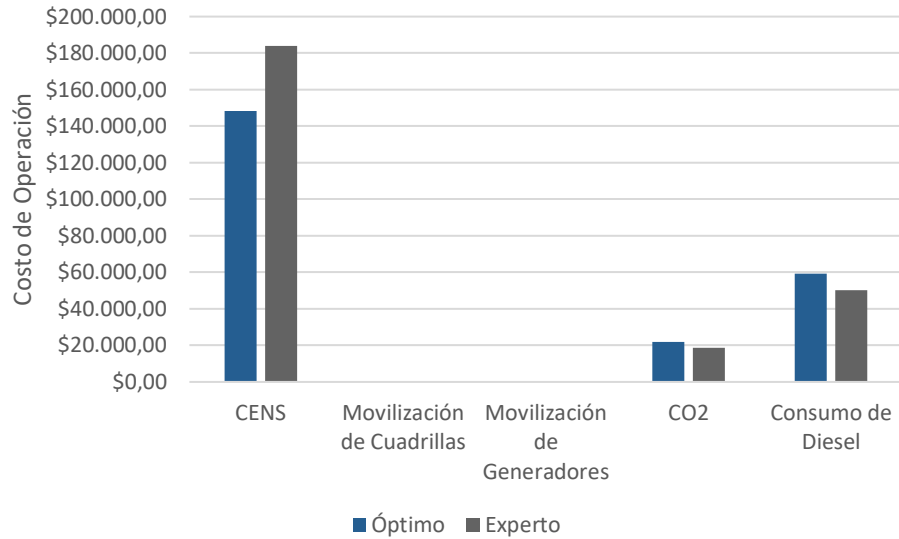


	Optimo Nodo Tiempo	Experto Nodo Tiempo		Optimo Nodo Tiempo	Experto Nodo Tiempo
G	19 2-144 - -	66 2-144 - -	C3	13 24-53 3 78-129	3 2-53 67 62-77
C1	23 4-59 - -	13 3-18 23 24-80	C4	67 8-23 1 68-129	- - 1 62-53
C2	7 2-129 - -	7 2-129 - -	C5	- - 2 74-129	2 2-57 58 55-113





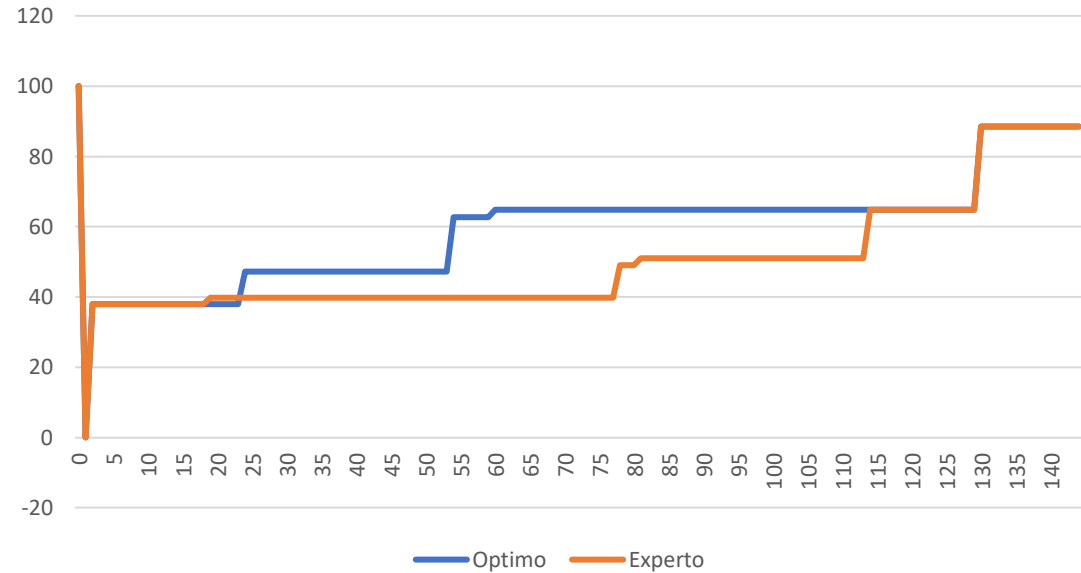
RESULTADOS (SISTEMA REAL)



CO= 229.500,34 USD Modelo Óptimo

CO= 252.579,84 USD Modelo Experto

Diferencia CO
\$23.079,50



Caso	ENS [MWh]	EIU_p [%]	Resiliencia operativa π 50% [kW/h]	Resiliencia operativa π 80% [kW/h]	Resiliencia infraestructura π 50% [Nodo/h]	Resiliencia infraestructura π 80% [Nodo/h]
Óptimo	331.55	19	5.10	1.28	1.31	1.10
Experto	404.55	34	3.44	1.28	0.88	1.10



- Este artículo presenta una metodología novedosa para mejorar la resiliencia mediante la optimización de la programación de recursos y de la restauración en las operaciones del sistema de distribución de energía eléctrica tras un HILP.
- Los resultados muestran que el coste operativo de los sistemas estudiados se reduce cuando se considera nuestro modelo óptimo en comparación con la recuperación mediante criterios expertos.
- Las métricas de resiliencia en términos de capacidad de suministro de energía, resiliencia operativa y de infraestructura fueron mejoradas demostrando que nuestra metodología propuesta mejora la resiliencia de los sistemas eléctricos de distribución frente a las amenazas naturales.
- El marco metodológico práctico podría ser utilizado por la empresa distribuidora de energía eléctrica tomadores de decisiones para realizar la restauración del sistema frente a la ocurrencia de un peligro natural.



- [1] R. J. Campbell and S. Lowry, “Weather-related power outages and electric system resiliency,” Congressional Research Service, Library of Congress Washington, DC, 2012.
- [2] I. Aguilar and G. E. Alvarado, “Pérdidas humanas y económicas causadas por el vulcanismo en Costa Rica entre 1953 y 2005,” *Revista Geológica de América Central*, no. 51, pp. 93–128, 2014.
- [3] M. Figueroa-Candia, F. A. Felder, and D. W. Coit, “Resiliency-based optimization of restoration policies for electric power distribution systems,” *Electric Power Systems Research*, vol. 161, pp. 188–198, 2018.
- [4] M. Panteli, P. Mancarella, D. N. Trakas, E. Kyriakides, and N. D. Hatziaargyriou, “Metrics and quantification of operational and infrastructure resilience in power systems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 6, pp. 4732–4742, 2017.
- [5] Arif, Z. Wang, J. Wang, and C. Chen, “Power distribution system outage management with co-optimization of repairs, reconfiguration, and dispatch,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 5, pp. 4109–4118, 2017.
- [6] A. Alzate, O. D. Montoya, R. A. Hincapié, and M. Granada, “Optimal allocation of reclosers in distribution systems considering reliability in communication channels,” in *2015 IEEE 6th Latin American Symposium on Circuits Systems (LASCAS)*, pp. 1–4, 2015.
- [7] M. Saltos-Rodríguez, M. Aguirre-Velasco, A. Velásquez-Lozano, D. Ortiz-Villalba, and A. Villamarín-Jácome, “Distributed generation for resilience enhancement on power distribution system against lahars occurrence after a volcanic eruption,” in *2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)*, pp. 1–5, 2021.
- [8] ELEPCOS.A, “ELEPCOGEOPORTAL.” <https://gissigde.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=aa01636ecf6448cf82bd2dae559a63c0>, 2021. Online; accessed 29 January 2021.
- [8] SNGR, “SECRETARÍA NACIONAL DE GESTIÓN DE RIESGOS.” <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/2015/08/cotopaxi-pdf/>, 2021. Online; accessed 29 January 2021.
- [9] A. Velásquez-Lozano, M. Aguirre-Velasco, M. Saltos-Rodríguez, D. Ortiz-Villalba, and A. Villamarín-Jácome, “Optimal planning of var compensator for voltage regulation enhancement on power distribution systems against volcanic eruptions events,” in *2021 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, pp. 298–304, 2021.





Llumigusín Alexandra
gallumigusin@espe.edu.ec



Yánez Jhonatan
jaynezc@espe.edu.ec



Ing. Ortiz Diego MSc
ddortiz5@espe.edu.ec



Ing. Saltos Miguel
masaltos2@espe.edu.ec



Ing. Velásquez Andrés
amvelasquez1@espe.edu.ec



1. Villamarín-Jácome, J.R. Haro, M. Aguirre-Velasco and D. Ortiz-Villalba, **“Evaluación de Resiliencia en el Sistema Eléctrico Ecuatoriano frente a Eventos Sísmicos”**, Revista Técnica "Energía", vol. 17, pp. 18-28, Jan. 2021.
2. M. Saltos-Rodríguez, M. Aguirre-Velasco, A. Velásquez-Lozano, A. Villamarín-Jácome, J. R. Haro and D. Ortiz-Villalba, **"Resilience Assessment in Electric Power Systems Against Volcanic Eruptions: Case on Lahars Occurrence,"** 2021 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech), 2021, pp. 305-311.
3. A. Velásquez-Lozano, M. Aguirre-Velasco, M. Saltos-Rodríguez, D. Ortiz-Villalba and A. Villamarín-Jácome, **"Optimal Planning of VAR Compensator for Voltage Regulation Enhancement on Power Distribution Systems Against Volcanic Eruptions Events,"** 2021 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech), 2021, pp. 298-304.
4. M. Aguirre-Velasco, M. Saltos-Rodríguez, A. Velásquez-Lozano, D. Ortiz-Villalba and A. Villamarín-Jácome, **"Network Allocation and Optimal Sizing of BESS for Resilience Enhancement on Power Distribution Systems Against Volcanic Eruption,"** 2021 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), 2021.
5. M. Saltos-Rodríguez, M. Aguirre-Velasco, A. Velásquez-Lozano, D. Ortiz-Villalba and A. Villamarín-Jácome, **"Distributed Generation for Resilience Enhancement on Power Distribution System Against Lahars Occurrence After a Volcanic Eruption,"** 2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America), 2021, pp. 1-5.



6. A. Velásquez-Lozano; M. Aguirre -Velasco; M. Saltos-Rodríguez; M. Macias-Bermudez; D. Ortiz-Villalba; J. Llanos; D. Arcos-Aviles; and Wilmar Martinez , “Practical Framework for Optimal Planning of Isolated Rural Microgrids”, CIT 2021 Conference.

7. M. Saltos-Rodriguez; M. Aguirre-Velasco; A. Velásquez-Lozano; A.Villamarín-Jacome; and D.Ortiz-Villalba “Distributed Generation for Resilience Enhancement on Power Distribution System Against Lahars Occurrence After a Volcanic Eruption”, 2021 IEEE PES ISGT Latinoamérica.

8. M. Aguirre-Velasco; M. Saltos-Rodriguez; A. Velásquez-Lozano; and D.Ortiz-Villalba, ”Optimal Sizing and Placement of Battery Energy Storage System for Resilience Enhancement in Power Distribution Systems Against Volcanic Eruptions”, 13th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference 2021.

9. M.Saltos-Rodriguez; M. Aguirre-Velasco; A. Velásquez-Lozano; D.Ortiz-Villalba;A.Villamarín-Jacome; and J.R. Haro,” Resilience Assessment in Electric Power Systems Against Volcanic ash”, 2022 IEEE PES General Meeting,((full paper accepted).



- G. Llumigusín-Cachipuz, J. Yáñez-Chancusig, D. Ortiz-Villalba , M. Saltos-Rodríguez and A. Velásquez-Lozano , “Optimizing Resource and Restoration Scheduling for Power Distribution Systems After a Natural Hazards: A Case Study with Volcanic Lahars,” *2021 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2022, (To be published)

