



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



**Departamento de Eléctrica y Electrónica**

**Carrera de Ingeniería Electromecánica**

**Proyecto de Integración Curricular previo a la obtención del título de Ingeniero Electromecánico**

**Tema: “Planeación de la expansión de líneas de transmisión con análisis de confiabilidad y restricciones de seguridad N-1”**

**Expositores**

**Andino Soriano, Guido Anthony y Caicedo Barrionuevo, Kevin Fernando**

**Director de proyecto:**

**Ing. Masache Almeida, Paul Andrés**

**Latacunga  
Febrero, 2023**

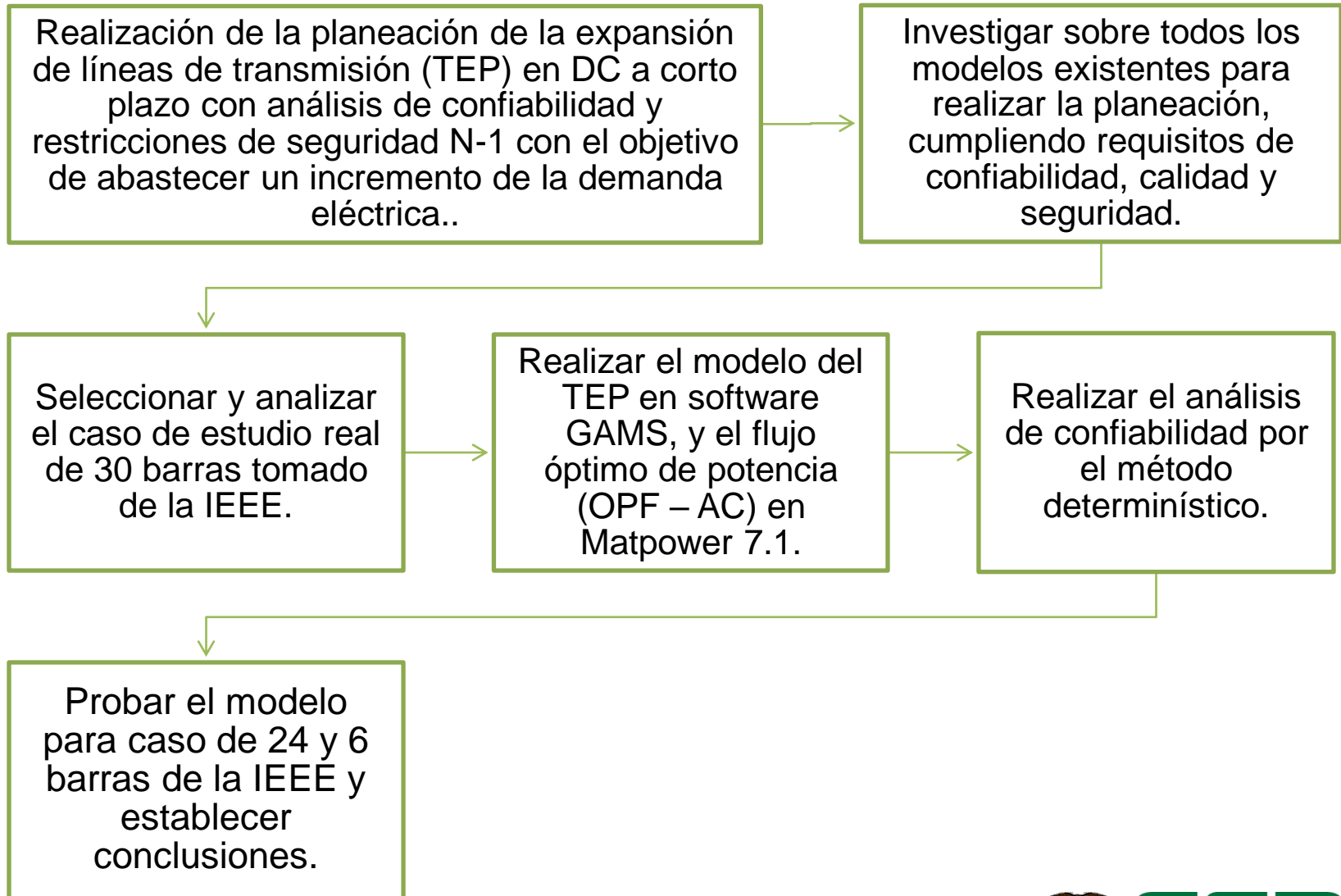


# CONTENIDO

- Resumen
- Planteamiento del problema
- Justificación
- Objetivos
- Metodología
- Caso de estudio
- Análisis de resultados
- Conclusiones
- Recomendaciones



# RESUMEN



# PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La electricidad a pasado de ser un servicio a una necesidad

Altos costos de inversión en la construcción de infraestructura

Demanda de energía eléctrica se incrementa con el tiempo

Brindar un servicio de calidad a los usuarios



**Planeación de la expansión de líneas de transmisión con análisis de confiabilidad y restricciones de seguridad N-1.**



Dependencia de la energía eléctrica

Genera estudios de nuevos modelos de planeación

Planeación de la expansión de líneas de transmisión

Realizar análisis de confiabilidad en los sistemas eléctricos



# JUSTIFICACIÓN

Desarrollo de un método de planeación a corto plazo a través de un software computacional.



Verificar cómo está operando el sistema eléctrico antes y después, logrando optimizar recursos energéticos y económicos.



Realizar pruebas teniendo en consideración varios casos de estudio de la IEEE y a su vez realizar análisis de confiabilidad.



# OBJETIVOS

## OBJETIVO GENERAL

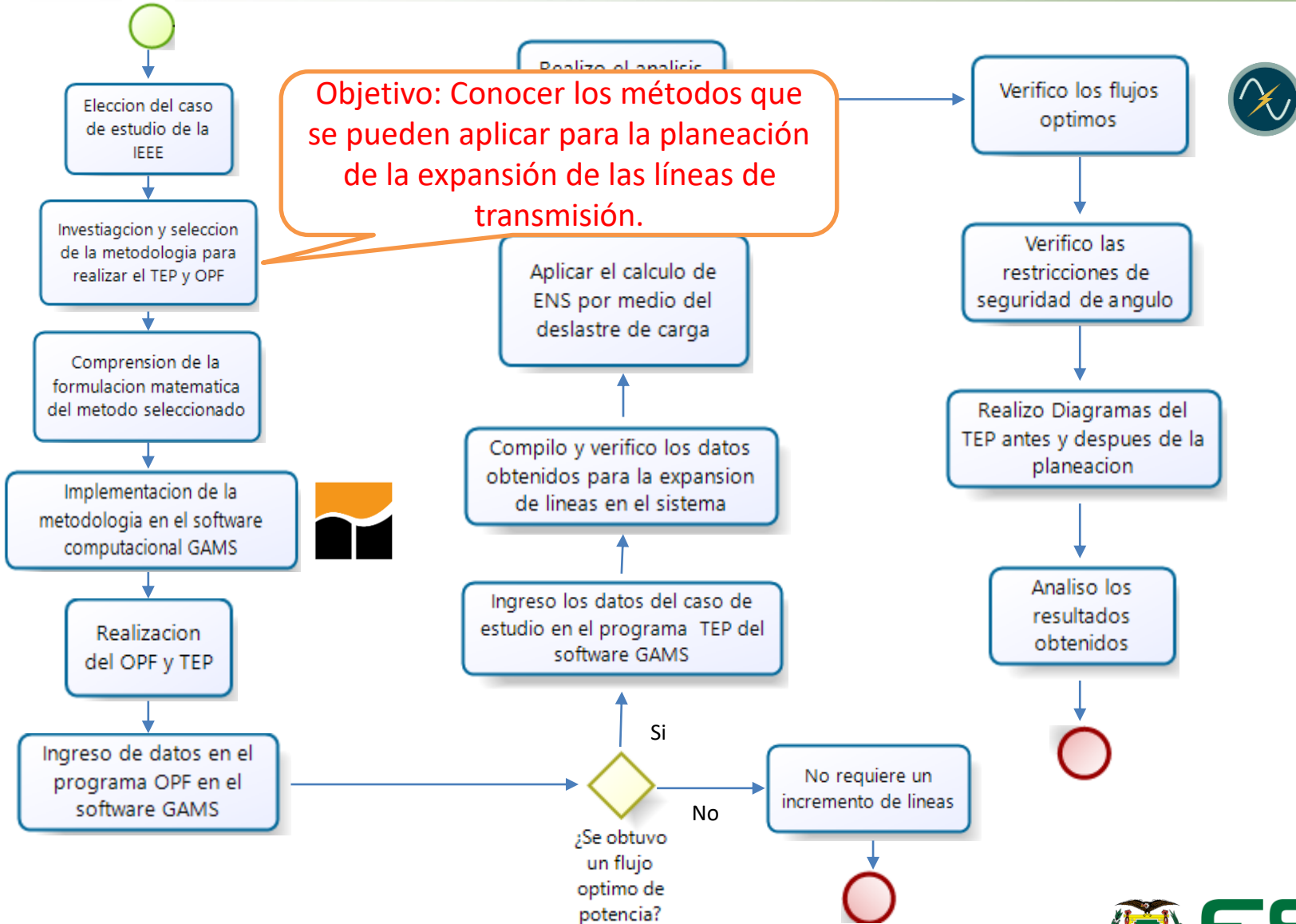
- Determinar el plan de expansión para sistemas eléctricos de potencia con la finalidad de abastecer un incremento de la demanda eléctrica con análisis de confiabilidad y restricciones de seguridad del sistema.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conocer los métodos que se pueden aplicar para la planeación de la expansión de las líneas de transmisión.
- Comparar el sistema eléctrico, antes de la planeación y después de la planeación por medio de un análisis de confiabilidad.
- Analizar el método para una restricción N-1 por medio de la verificación de la seguridad del sistema eléctrico.



# METODOLOGÍA



Datos:

Barras, generadores,  $k_1, k_2$ , barra slack, potencia base, M

Generador:  $Pg^{min}, Pg^{max}, Qg^{min}, Qg^{max}, a, b, c$

Líneas:  $r, x, b, SIL, C_{ij}, n_{ij}^0$

Barra: ángulo del voltaje  $\delta$ , voltaje de barra  $V$

Demanda:  $P_d, Q_d$

Paso 1

OPF - DC con la minimización de costos operativos

Minimizar el Costo Operativo Total  $OF = \sum_{g \in \Omega_G} b_g P_g$

Flujo de potencia  $P_{ij} = B_{ij}(\delta_i - \delta_j)$

Balance energético nodal de potencia activa

$$\sum_{ij} P_{g_i} - \sum_i P_{d_i} = \sum_{ij} P_{ij}$$

Paso 2





### Paso 3

OPF - AC con la minimización de costos operativos

Función objetivo

$$OF = \sum_{g \in \Omega_G} a_g (P_g)^2 + b_g P_g + c_g$$

Flujo de potencia activa

$$P_{ij} = V_i * V_j [B_{ij} * \text{Sen}(\delta_i - \delta_j)]$$

Flujo de potencia reactiva  $Q_{ij} = V_i^2 * B_{ij} - V_i * V_j * [B_{ij} * \text{Cos}(\delta_i - \delta_j)]$

Balance energético nodal de potencia activa

$$\sum_{ij} P_{g_i} - \sum_i P_{d_i} = \sum_{ij} P_{ij}$$

Balance energético nodal de potencia reactiva

$$\sum_{ij} Q_{g_i} - \sum_i Q_{d_i} = \sum_{ij} Q_{ij}$$

### Paso 4

TEP-DC con opción a nuevas líneas

Función objetivo

$$OF = T \times OPC + INVC$$

Costos de operación OPC

$$OPC = \sum_{g \in \Omega_G} b_g P_g$$

Costos de inversión INVC

$$INVC = \left( -n_{ij}^0 + \sum_{k,ij} \alpha_{ij}^k \right) C_{ij}$$

Flujo de potencia en las líneas de transmisión

$$P_{ij}^k - B_{ij}(\delta_i - \delta_j) \leq (1 - \alpha_{ij}^k)M$$

$$P_{ij}^k - B_{ij}(\delta_i - \delta_j) \geq (1 - \alpha_{ij}^k)M$$

Equilibrio de potencia entre la potencia generada, el deslastre de carga, la demanda y los flujos de línea

$$\sum_{g \in \Omega_G^i} P_g + LS_i - Pd_i = \sum_{j \in \Omega_i^i} P_{ij}$$

Límites de flujo de línea

$$-P_{ij}^{max} \alpha_{ij}^k \leq P_{ij}^k \leq P_{ij}^{max} \alpha_{ij}^k$$

Límites operativos de generación

$$P_g^{min} \leq P_g \leq P_g^{max}$$



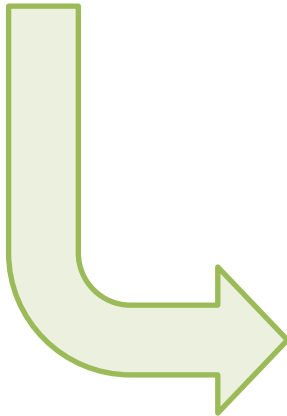


### Restricciones de seguridad

Límite del Angulo delta (Angulo de voltaje en barra)

$$-\frac{\pi}{3} \leq \delta_i \leq \frac{\pi}{3}$$

Paso 5



### Análisis de confiabilidad

$$D = MHA I * \% \frac{AÑO}{Escenario}$$

$$ENS = LS * D$$

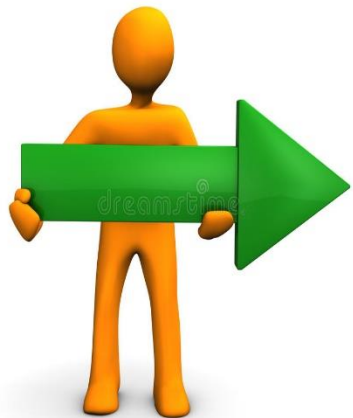
Paso 6



## Análisis de confiabilidad

### ENS (Energía No Suministrada)

Cantidad total de energía que se espera que no sea entregada a los usuarios.



$$ENS = D * LS$$

Donde:

*D*: Duración del evento (Horas/año)

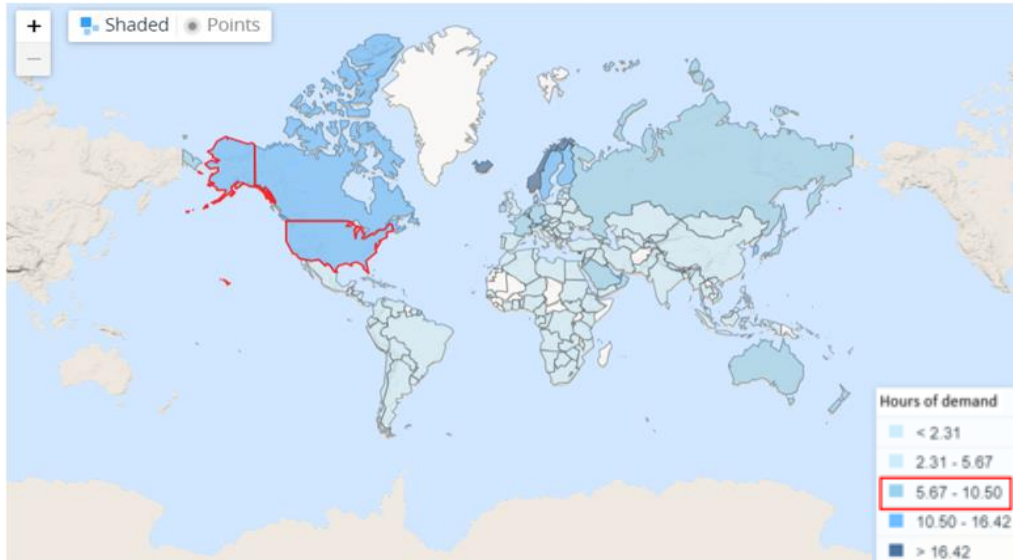
*LS*: Deslaste o Demanda no atendida (MW)



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# Cálculo de la Duración del evento (Horas/año)

$$D = MHAI * \% \frac{AÑO}{Escenario}$$



$$\% \frac{AÑO}{Escenario} = 33.68\%$$

MHAI

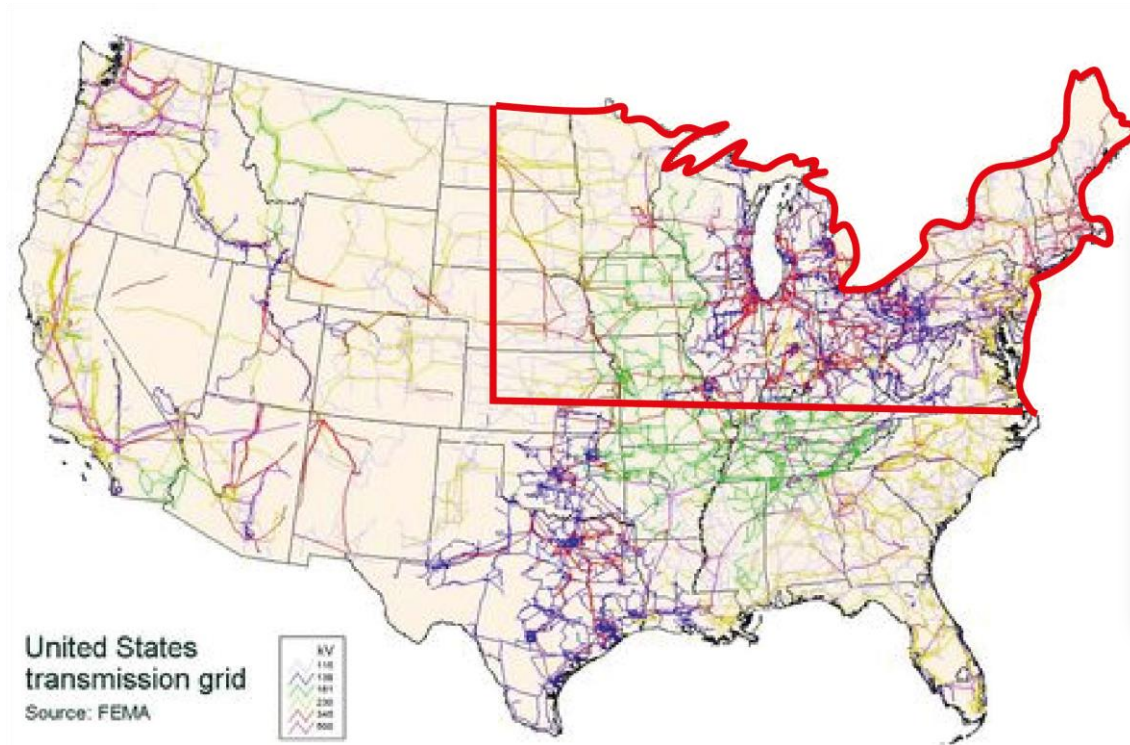
## Resolución CREG 097-2008.

Activos	Máximos Horas de Indisponibilidad (MHAI)	Resolución
Bahía de línea	15	CREG 011-2009
Bahía de Transformador	15	CREG 011-2009
Bahía de Compensación	16	CREG 011-2009
Módulo de Barraje	15	CREG 011-2009
Módulo de compensación	15	CREG 011-2009
Autotransformador	28	CREG 011-2009
Línea de 220 o 230 kV	20	CREG 011-2009
Línea de 500 kV	37	CREG 011-2009
VQC	5	CREG 011-2009
Otros Activos	10	CREG 011-2009
Conexión al STN	51	CREG 097-2008
Equipos de Compensación	31	CREG 097-2008
<b>Línea Nivel &gt;110 kV</b>	<b>38</b>	<b>CREG 097-2008</b>
Módulo de Barraje	15	CREG 097-2008



# CASO DE ESTUDIO

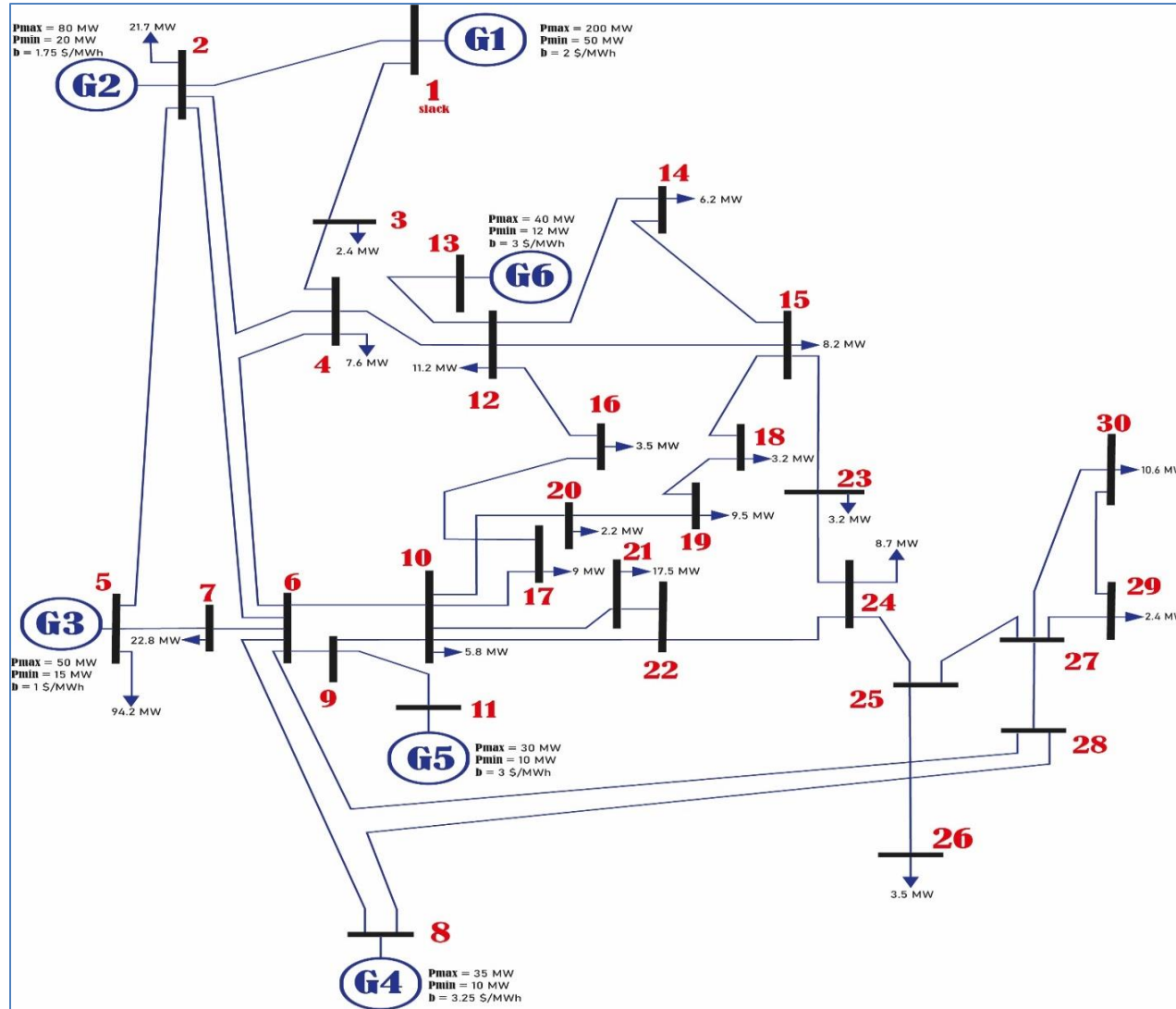
## 30-Bus System (IEEE Test Case)



El caso de prueba de IEEE de 30 barras representa una parte del sistema de energía eléctrica estadounidense (en el medio oeste de EE. UU.) en diciembre de 1961. Este caso de prueba consta de 30 barras, 6 generadores.



# Diagrama del Sistema



# Datos proporcionados

Generadores

Generador	Barra	Costos de generación			Potencia activa		Potencia reactiva	
		a (\$/h)	b (\$/MWh)	c (\$/MW <sup>2</sup> h)	$Pg^{min}$ (MW)	$Pg^{max}$ (MW)	$Qg^{min}$ (MVAR)	$Qg^{max}$ (MVAR)
<b>g1</b>	1	0.00375	2	0	50	200	-	-
<b>g2</b>	2	0.0175	1.75	0	20	80	-20	100
<b>g3</b>	5	0.0625	1	0	15	50	-15	80
<b>g4</b>	8	0.00834	3.25	0	10	35	-15	60
<b>g5</b>	11	0.025	3	0	10	30	-10	50
<b>g6</b>	13	0.025	3	0	12	40	-15	60

Potencia demandada

Barra	Demanda		Barra	Demanda	
	Pd (MW)	Qd (MVAR)		Pd (MW)	Qd (MVAR)
<b>1</b>	0	0	<b>16</b>	3.5	1.8
<b>2</b>	21.7	12.7	<b>17</b>	9	5.8
<b>3</b>	2.4	1.2	<b>18</b>	3.2	0.9
<b>4</b>	7.6	1.6	<b>19</b>	9.5	3.4
<b>5</b>	94.2	19	<b>20</b>	2.2	0.7
<b>6</b>	0	0	<b>21</b>	17.5	11.2
<b>7</b>	22.8	10.9	<b>22</b>	0	0
<b>8</b>	30	30	<b>23</b>	3.2	1.6
<b>9</b>	0	0	<b>24</b>	8.7	6.7
<b>10</b>	5.8	2	<b>25</b>	0	0
<b>11</b>	0	0	<b>26</b>	3.5	2.3
<b>12</b>	11.2	7.5	<b>27</b>	0	0
<b>13</b>	0	0	<b>28</b>	0	0
<b>14</b>	6.2	1.6	<b>29</b>	2.4	0.9
<b>15</b>	8.2	2.5	<b>30</b>	10.6	1.9



Líneas

De la barra	A la barra	Datos de la línea					
		R ( $\Omega$ )	X ( $\Omega$ )	b (U)	SIL (MW)	Cij (\$/h)	n <sup>o</sup> <sub>ij</sub>
1	2	0.0192	0.0575	0.0264	130.00	24,73	1
1	3	0.0452	0.1852	0.0204	130.00	35,08	1
2	4	0.057	0.1737	0.0184	65.00	58,21	1
3	4	0.0132	0.0379	0.0042	130.00	79,91	1
2	5	0.0472	0.0198	0.0209	130.00	82,37	1
2	6	0.0581	0.1763	0.0187	65.00	19,20	1
4	6	0.0119	0.0414	0.0045	90.00	54,14	1
5	7	0.046	0.116	0.0102	70.00	7,08	1
6	7	0.0267	0.082	0.0085	130.00	14,86	1
6	8	0.012	0.042	0.0045	32.00	11,94	1
6	9	0	0.208	0	65.00	35,03	1
6	10	0	0.556	0	32.00	2,39	1
9	11	0	0.208	0	65.00	9,55	1
9	10	0	0.11	0	65.00	105,90	1
4	12	0	0.256	0	65.00	63,26	1
12	13	0	0.14	0	65.00	1,73	1
12	14	0.1231	0.2559	0	32.00	3,45	1
12	15	0.0662	0.1304	0	32.00	11,15	1
12	16	0.0945	0.1987	0	32.00	20,44	1
14	15	0.221	0.1987	0	16.00	14,24	1
16	17	0.0824	0.1932	0	16.00	16,72	1
15	18	0.107	0.2185	0	16.00	9,20	1
18	19	0.0639	0.1292	0	16.00	26,89	1
19	20	0.034	0.068	0	32.00	21,23	1
10	20	0.0936	0.209	0	32.00	13,45	1
10	17	0.0324	0.0845	0	32.00	19,11	1
10	21	0.0348	0.0749	0	32.00	18,31	1
10	22	0.0727	0.1499	0	32.00	22,29	1
21	22	0.0116	0.0236	0	32.00	18,98	1
15	23	0.1	0.202	0	16.00	11,50	1
22	24	0.115	0.179	0	16.00	4,60	1
23	24	0.132	0.27	0	16.00	7,43	1
24	25	0.1885	0.3292	0	16.00	24,06	1
25	26	0.2544	0.38	0	16.00	23,36	1
25	27	0.1093	0.2087	0	16.00	9,55	1
28	27	0	0.369	0	65.00	25,48	1
27	29	0.2198	0.4153	0	16.00	18,31	1
27	30	0.3202	0.6027	0	16.00	10,35	1
29	30	0.2399	0.4533	0	16.00	24,73	1
8	28	0.636	0.2	0.0214	32.00	6,19	1
6	28	0.0169	0.0599	0.0065	32.00	24,06	1





# Análisis de resultados del flujo óptimo de potencia DC en el sistema propuesto.

Barra(i)	Generación	Ángulo de voltaje	Demanda	$\lambda_i$ (\$/MWh)
	Pg (MW)	$\delta_i$ (rad)	Pd (MW)	
1	121.4	0	0	2
2	80	-0.046	21.7	2
3	-	-0.078	2.4	2
4	-	-0.093	7.6	2
5	50	-0.061	94.2	2
6	-	-0.105	-	2
7	-	-0.098	22.8	2
8	10	-0.114	30	2
9	-	-0.148	-	2
10	-	-0.182	5.8	2
11	10	-0.127	-	2
12	-	-0.169	11.2	2
13	12	-0.153	-	2
14	-	-0.189	6.2	2
15	-	-0.191	8.2	2
16	-	-0.182	3.5	2
17	-	-0.187	9	2
18	-	-0.203	3.2	2
19	-	-0.206	9.5	2
20	-	-0.201	2.2	2
21	-	-0.194	17.5	2
22	-	-0.193	-	2
23	-	-0.200	3.2	2
24	-	-0.203	8.7	2
25	-	-0.196	-	2
26	-	-0.209	3.5	2
27	-	-0.185	-	2
28	-	-0.116	-	2
29	-	-0.210	2.4	2
30	-	-0.226	10.6	2

Dato	Valor
Función objetivo	531.3 \$/h



Indica que los costos totales de operación en el sistema serán de 531.3 \$/h



Resultados del OPF-DC del caso de 30 barras.



De la barra	A la barra	Pij (MW)	De la barra	A la barra	Pij (MW)
1	2	79,26	12	14	7,52
1	3	42,14	12	15	16,76
2	4	27,37	12	16	6,29
2	5	76,24	13	12	12
2	6	33,95	14	15	1,32
3	4	39,74	15	18	5,55
4	6	29,74	15	23	4,33
4	12	29,77	16	17	2,79
5	7	32,04	18	19	2,35
6	8	20,9	20	19	7,15
6	9	20,6	22	21	1,96
6	10	13,76	22	24	5,5
6	28	17,67	23	24	1,13
7	6	9,24	25	24	2,07
8	28	0,9	25	26	3,5
9	10	30,6	27	25	5,57
10	17	6,21	27	29	6,06
10	20	9,35	27	30	6,94
10	21	15,54	28	27	18,57
10	22	7,46	29	30	3,66
11	9	10			



Flujos de potencia  
en las líneas



# Análisis de resultados del flujo óptimo de potencia AC en el sistema propuesto.

Dato	Valor
<b>Función objetivo</b>	801.42 \$/h



Indica que los costos totales de operación en el sistema serán de 801.42 \$/h

Resultados del OPF-AC del caso de 30 barras.



Barra	Voltaje		Generación		Demanda		$\lambda$ (\$/MVAh)	
	V(pu)	$\delta_i$ (deg)	Pg (MW)	Qg (MVAr)	Pd (MW)	Qd (MVAr)	P	Q
1	1.100	0	176.87	0.00	-	-	3.327	-0.013
2	1.082	-3.444	48.79	20.47	21.70	12.70	3.458	-
3	1.068	-5.301	-	-	2.40	1.20	3.526	0.012
4	1.063	-6.406	-	-	7.60	1.60	3.567	0.012
5	1.054	-9.755	21.46	30.50	94.20	19.00	3.682	-
6	1.060	-7.444	-	-	-	-	3.601	0.011
7	1.050	-8.830	-	-	22.80	10.90	3.659	0.021
8	1.066	-7.760	21.49	51.07	30.00	30.00	3.608	-
9	1.059	-9.472	-	-	-	-	3.603	0.013
10	1.037	-11.249	-	-	5.80	2.00	3.605	0.022
11	1.100	-8.226	12.06	21.68	-	-	3.603	-
12	1.056	-10.671	-	-	11.20	7.50	3.562	-
13	1.084	-9.830	12.00	22.17	-	-	3.562	-
14	1.040	-11.561	-	-	6.20	1.60	3.621	0.020
15	1.034	-11.599	-	-	8.20	2.50	3.641	0.035
16	1.041	-11.192	-	-	3.50	1.80	3.601	0.021
17	1.033	-11.434	-	-	9.00	5.80	3.617	0.030
18	1.023	-12.185	-	-	3.20	0.90	3.679	0.049
19	1.020	-12.343	-	-	9.50	3.40	3.687	0.052
20	1.023	-12.121	-	-	2.20	0.70	3.669	0.045
21	1.026	-11.690	-	-	17.50	11.20	3.640	0.044
22	1.026	-11.679	-	-	-	-	3.639	0.044
23	1.021	-11.932	-	-	3.20	1.60	3.675	0.060
24	1.013	-12.039	-	-	8.70	6.70	3.690	0.077
25	1.017	-11.960	-	-	-	-	3.670	0.063
26	1.000	-12.385	-	-	3.50	2.30	3.736	0.108
27	1.028	-11.640	-	-	-	-	3.630	0.035
28	1.056	-7.890	-	-	-	-	3.621	0.017
29	1.009	-12.868	-	-	2.40	0.90	3.729	0.063
30	0.997	-13.728	-	-	10.60	1.90	3.798	0.074



## Flujos de potencia en las líneas

De la barra	A la barra	De la barra		A la barra		Perdidas ( $I^2 \cdot Z$ )	
		$P_{ij}$ (MW)	$Q_{ij}$ (MVAr)	$P_{ij}$ (MW)	$Q_{ij}$ (MVAr)	$P_{ij}$ (MW)	$Q_{ij}$ (MVAr)
1	2	118.21	-4.72	-115.90	8.09	2.311	6.93
1	3	58.66	4.72	-57.23	-1.61	1.437	5.46
2	4	35.25	-0.30	-34.62	-0.19	0.637	1.81
3	4	54.83	0.41	-54.56	0.64	0.264	1.05
2	5	63.34	1.36	-61.63	3.22	1.716	6.86
2	6	44.39	-1.38	-43.38	2.11	1.010	3.03
4	6	49.50	-6.07	-49.28	6.95	0.220	0.88
5	7	-11.12	8.49	11.21	-9.38	0.092	0.22
6	7	34.33	1.25	-34.01	-1.52	0.315	0.84
6	8	11.15	-17.68	-11.11	17.84	0.039	0.16
6	9	18.92	1.10	-18.92	-0.43	-0.000	0.67
6	10	13.04	4.76	-13.04	-3.80	0.000	0.96
9	11	-12.06	-20.62	12.06	21.68	0.000	1.07
9	10	30.98	21.04	-30.98	-19.67	0.000	1.38
4	12	32.08	4.02	-32.08	-1.61	0.000	2.41
12	13	-12.00	-21.41	12.00	22.17	0.000	0.76
12	14	7.90	2.91	-7.82	-2.74	0.076	0.17
12	15	17.93	8.03	-17.68	-7.58	0.242	0.45
12	16	7.06	4.59	-7.01	-4.46	0.057	0.13
14	15	1.62	1.14	-1.61	-1.14	0.008	0.01

De la barra	A la barra	De la barra		A la barra		Perdidas ( $I^2 \cdot Z$ )	
		$P_{ij}$ (MW)	$Q_{ij}$ (MVAr)	$P_{ij}$ (MW)	$Q_{ij}$ (MVAr)	$P_{ij}$ (MW)	$Q_{ij}$ (MVAr)
16	17	3.51	2.66	-3.49	-2.63	0.014	0.03
15	18	6.01	2.17	-5.96	-2.09	0.042	0.08
18	19	2.76	1.19	-2.76	-1.18	0.005	0.01
19	20	-6.74	-2.22	6.76	2.26	0.015	0.03
10	20	9.03	3.13	-8.96	-2.96	0.076	0.18
10	17	5.52	3.20	-5.51	-3.17	0.011	0.03
10	21	16.23	10.61	-16.13	-10.36	0.105	0.24
10	22	7.43	4.52	-7.39	-4.42	0.049	0.11
21	22	-1.37	-0.84	1.38	0.84	0.000	0.00
15	23	5.09	4.04	-5.05	-3.96	0.040	0.08
22	24	6.01	3.58	-5.95	-3.50	0.056	0.08
23	24	1.85	2.36	-1.84	-2.34	0.011	0.02
24	25	-0.91	-0.82	0.91	0.83	0.003	0.00
25	26	3.54	2.37	-3.50	-2.30	0.044	0.07
25	27	-4.45	-3.19	4.48	3.26	0.032	0.06
28	27	17.76	7.94	-17.76	-6.58	0.000	1.36
27	29	6.17	1.67	-6.08	-1.51	0.085	0.16
27	30	7.11	1.66	-6.95	-1.35	0.161	0.30
29	30	3.68	0.61	-3.65	-0.55	0.033	0.06
8	28	2.59	3.23	-2.58	-5.44	0.014	0.05
6	28	15.23	1.51	-15.18	-2.50	0.042	0.13



De todas las líneas presentes en el sistema, las que mayor potencia transmiten son la 1-2 y 2-5



De la barra	A la barra	De la barra		A la barra		Perdidas ( $I^2 \cdot Z$ )	
		$P_{ij}$ (MW)	$Q_{ij}$ (MVar)	$P_{ij}$ (MW)	$Q_{ij}$ (MVar)	$P_{ij}$ (MW)	$Q_{ij}$ (MVar)
1	2	118.21	-4.72	-115.90	8.09	2.311	6.93
2	5	63.34	1.36	-61.63	3.22	1.716	6.86



## Análisis de confiabilidad del sistema propuesto

Deslaste de carga en el sistema

Deslaste  
LS (MW)  
0

Criterio de Energía no suministrada

$$ENS = LS * D$$

$$ENS = 0$$

ENS



# Análisis de la planeación de la expansión de líneas de transmisión con restricciones de seguridad N-1.

Generadores

Generador	Pg (MW)
g1	116,97
g2	80
g3	50
g4	10
g5	14,93
g6	40

Ángulos de voltaje

Barra	$\delta_i$ (rad)
1	0
2	-0.0443
3	-0.0738
4	-0.0880
5	-0.0594
6	-0.1043
7	-0.0967
8	-0.1139
9	-0.1311
10	-0.1618
11	-0.1001
12	-0.1281
13	-0.0721
14	-0.1528
15	-0.1596

Barra	$\delta_i$ (rad)
16	-0.1494
17	-0.1633
18	-0.1757
19	-0.1811
20	-0.1775
21	-0.1781
22	-0.1791
23	-0.1838
24	-0.2076
25	-0.2603
26	-0.3211
27	-0.2269
28	-0.1199
29	-0.2521
30	-0.2687

Deslaste

Barra	Deslaste
	LS (MW)
26	1.5

Objetivo: Analizar el método para una restricción N-1 por medio de la verificación de la seguridad del sistema eléctrico.

## Flujos de potencia con las nuevas líneas creadas

De la barra	A la barra	K	Pij (MW)	De la barra	A la barra	K	Pij (MW)
1	2	k1	77,12	14	12	k1	-9,63
1	2	k2		14	12	k2	
1	3	k1	39,85	14	15	k1	3,43
1	3	k2		14	15	k2	
2	1	k1	-77,12	15	12	k1	-24,14
2	1	k2		15	12	k2	
2	4	k1	25,14	15	14	k1	-3,43
2	4	k2		15	14	k2	
2	5	k1	76,29	15	18	k1	7,38
2	5	k2		15	18	k2	
2	6	k1	34	15	23	k1	12
2	6	k2		15	23	k2	
3	1	k1	-39,85	16	12	k1	-10,7
3	1	k2		16	12	k2	
3	4	k1	37,45	16	17	k1	7,2
3	4	k2		16	17	k2	
4	2	k1	-25,14	17	10	k1	-1,8
4	2	k2		17	10	k2	
4	3	k1	-37,45	17	16	k1	-7,2
4	3	k2		17	16	k2	
4	6	k1	39,32	18	15	k1	-7,38
4	6	k2		18	15	k2	
4	12	k1	15,67	18	19	k1	4,18
4	12	k2		18	19	k2	

De la barra	A la barra	K	Pij (MW)	De la barra	A la barra	K	Pij (MW)
5	2	k1	-76,29	19	18	k1	-4,18
5	2	k2		19	18	k2	
5	7	k1	32,09	19	20	k1	-5,32
5	7	k2		19	20	k2	
6	2	k1	-34	20	10	k1	-7,52
6	2	k2		20	10	k2	
6	4	k1	-39,32	20	19	k1	5,32
6	4	k2		20	19	k2	
6	7	k1	-9,29	21	10	k1	-21,82
6	7	k2		21	10	k2	
6	8	k1	22,97	21	22	k1	4,32
6	8	k2		21	22	k2	
6	9	k1	12,92	22	10	k1	-11,58
6	9	k2		22	10	k2	
6	10	k1	10,34	22	21	k1	-4,32
6	10	k2	10,34	22	21	k2	
6	28	k1	26,03	22	24	k1	15,9
6	28	k2		22	24	k2	
7	5	k1	-32,09	23	15	k1	-12
7	5	k2		23	15	k2	
7	6	k1	9,29	23	24	k1	8,8
7	6	k2		23	24	k2	
8	6	k1	-22,97	24	22	k1	-15,9
8	6	k2		24	22	k2	



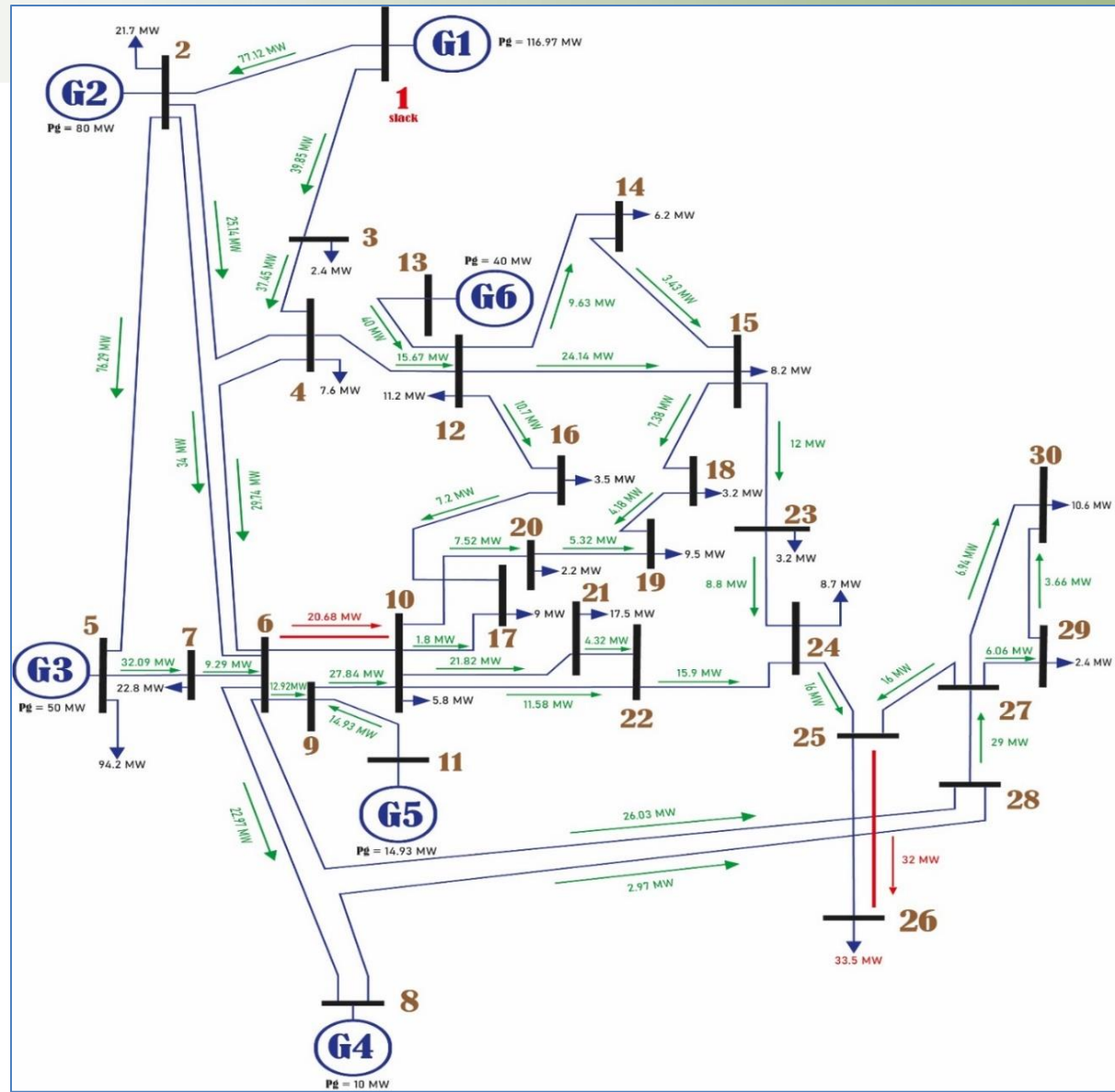


De la barra	A la barra	K	Pij (MW)	De la barra	A la barra	K	Pij (MW)
8	28	k1	2,97	24	23	k1	-8,8
8	28	k2		24	23	k2	
9	6	k1	-12,92	24	25	k1	16
9	6	k2		24	25	k2	
9	10	k1	27,84	25	24	k1	-16
9	10	k2		25	24	k2	
9	11	k1	-14,93	25	26	k1	16
9	11	k2		25	26	k2	16
10	6	k1	-10,34	25	27	k1	-16
10	6	k2	-10,34	25	27	k2	
10	9	k1	-27,84	26	25	k1	-16
10	9	k2		26	25	k2	-16
10	17	k1	1,8	27	25	k1	16
10	17	k2		27	25	k2	
10	20	k1	7,52	27	28	k1	-29
10	20	k2		27	28	k2	
10	21	k1	21,82	27	29	k1	6,06
10	21	k2		27	29	k2	
10	22	k1	11,58	27	30	k1	6,94
10	22	k2		27	30	k2	
11	9	k1	14,93	28	6	k1	-26,03
11	9	k2		28	6	k2	
121	4	k1	-15,67	28	8	k1	-2,97
12	4	k2		28	8	k2	

De la barra	A la barra	K	Pij (MW)	De la barra	A la barra	K	Pij (MW)
12	13	k1	-40	28	27	k1	29
12	13	k2		28	27	k2	
12	14	k1	9,63	29	27	k1	-6,06
12	14	k2		29	27	k2	
12	15	k1	24,14	29	30	k1	3,66
12	15	k2		29	30	k2	
12	16	k1	10,7	30	27	k1	-6,94
12	16	k2		30	27	k2	
13	12	k1	40	30	29	k1	-3,66
13	12	k2		30	29	k2	



Diagrama después de la planeación



# Análisis de resultados del flujo óptimo de potencia AC después del TEP .

Dato	Valor
<b>Función objetivo</b>	921.48 \$/h



Indica que los costos totales de operación en el sistema serán de 921.48 \$/h.

Barra	Voltaje		Generación		Demanda		$\lambda$ (\$/MVAh)	
	V (pu)	$\delta_i$ (deg)	Pg (MW)	Qg (MVAh)	Pd (MW)	Qd (MVAh)	P	Q
1	1.100	0	161.87	0.00	-	-	3,528	0.022
2	1.081	-3.141	47.86	20.47	21.70	12.70	3,659	-
3	1.077	-4.819	-	-	2.40	1.20	3,727	0.023
4	1.073	-5.809	-	-	7.60	1.60	3,768	0.034
5	1.095	-9.757	29.41	30.50	94.20	19.00	3,883	-
6	1.073	-6.912	-	-	-	-	3,802	0.031
7	1.074	-8.493	-	-	22.80	10.90	3,86	0.042
8	1.081	-7.342	18.41	51.07	30.00	30.00	3,809	-
9	1.065	-7.675	-	-	-	-	3,804	0.036
10	1.045	-9.786	-	-	5.80	2.00	3,806	0.042
11	1.100	-4.593	30.00	21.68	-	-	3,804	-
12	1.070	-8.225	-	-	11.20	7.50	3,763	-
13	1.100	-5.629	38.06	22.17	-	-	3,763	-
14	1.052	-9.329	-	-	6.20	1.60	3,822	0.032
15	1.044	-9.566	-	-	8.20	2.50	3,842	0.042
16	1.052	-9.151	-	-	3.50	1.80	3,802	0.036
17	1.042	-9.795	-	-	9.00	5.80	3,818	0.043
18	1.032	-10.340	-	-	3.20	0.90	3,88	0.061
19	1.028	-10.614	-	-	9.50	3.40	3,888	0.072
20	1.031	-10.458	-	-	2.20	0.70	3,87	0.056
21	1.031	-10.424	-	-	17.50	11.20	3,841	0.062
22	1.031	-10.472	-	-	-	-	3,84	0.065
23	1.024	-10.601	-	-	3.20	1.60	3,876	0.070
24	1.007	-11.696	-	-	8.70	6.70	3,891	0.085
25	0.986	-14.526	-	-	-	-	3,871	0.076
26	0.900	-20.423	-	-	33.5	2.30	3,937	0.122
27	1.017	-13.331	-	-	-	-	3,831	0.043
28	1.066	-7.549	-	-	-	-	3,822	0.032
29	0.997	-14.588	-	-	2.40	0.90	3,93	0.072
30	0.985	-15.470	-	-	10.60	1.90	3,999	0.096



Resultados del OPF-AC del caso de 30 barras después de la planeación.



De la barra	A la barra	De la barra		A la barra		Perdidas ( $I^2 \cdot Z$ )	
		Pij (MW)	Qij (MVar)	Pij (MW)	Qij (MVar)	Pij (MW)	Qij (MVar)
1	2	109.06	-0.47	-107.09	2.80	1.966	5.90
1	3	52.82	0.47	-51.66	1.54	1.154	4.38
2	4	30.00	-6.20	-29.52	5.23	0.475	1.35
3	4	49.26	-2.74	-49.05	3.58	0.210	0.84
2	5	63.31	-20.80	-61.43	25.95	1.880	7.52
2	6	39.95	-8.50	-39.10	8.72	0.847	2.54
4	6	52.36	-12.35	-52.11	13.36	0.251	1.00
5	7	-11.37	24.00	11.67	-24.45	0.306	0.73
6	7	34.83	-13.74	-34.47	13.55	0.361	0.96
6	8	15.82	-23.92	-15.75	24.20	0.071	0.29
6	9	7.26	4.18	-7.26	-4.05	0.000	0.13
6	10	10.04	5.79	-10.04	-5.14	0.000	0.65
9	11	-30.00	-16.78	30.00	18.97	0.000	2.19
9	10	37.26	20.84	-37.26	-19.07	0.000	1.77
4	12	18.62	1.94	-18.62	-1.15	0.000	0.79
12	13	-38.06	-22.26	38.06	24.64	0.000	2.38
12	14	9.63	2.79	-9.53	-2.57	0.106	0.23
12	15	24.67	8.50	-24.25	-7.73	0.417	0.77
12	16	11.18	4.62	-11.06	-4.36	0.115	0.26
14	15	3.33	0.97	-3.30	-0.94	0.024	0.02
16	17	7.56	2.56	-7.51	-2.45	0.046	0.11
15	18	7.56	1.90	-7.50	-1.78	0.061	0.12
18	19	4.30	0.88	-4.29	-0.85	0.011	0.02
19	20	-5.21	-2.55	5.22	2.57	0.010	0.02
10	20	7.47	3.40	-7.42	-3.27	0.056	0.13



Flujos de potencia en las líneas luego de la planeación.

10	17	1.49	3.36	-1.49	-3.35	0.004	0.01
10	21	21.79	10.86	-21.62	-10.48	0.163	0.38
10	22	10.74	4.60	-10.66	-4.41	0.088	0.19
21	22	4.12	-0.72	-4.12	0.73	0.002	0.00
15	23	11.80	4.27	-11.65	-3.98	0.145	0.29
22	24	14.78	3.68	-14.52	-3.29	0.262	0.39
23	24	8.45	2.38	-8.36	-2.19	0.096	0.20
24	25	14.17	-1.19	-13.79	1.84	0.379	0.66
25	26	27.52	5.38	-25.50	-2.30	2.023	3.08
25	27	-13.73	-7.22	14.00	7.74	0.272	0.52
28	27	27.29	14.44	-27.29	-11.08	0.000	3.36
27	29	6.17	1.68	-6.08	-1.51	0.087	0.17
27	30	7.12	1.66	-6.95	-1.35	0.165	0.31
29	30	3.68	0.61	-3.65	-0.55	0.034	0.06
8	28	4.16	5.80	-4.13	-7.99	0.034	0.11
6	28	23.26	5.61	-23.16	-6.45	0.101	0.30



De todas las líneas presentes en el sistema, las que mayor potencia transmiten son la 1-2 y 2-5



De la barra	A la barra	De la barra		A la barra		Perdidas ( $I^2 \cdot Z$ )	
		P <sub>ij</sub> (MW)	Q <sub>ij</sub> (MVar)	P <sub>ij</sub> (MW)	Q <sub>ij</sub> (MVar)	P <sub>ij</sub> (MW)	Q <sub>ij</sub> (MVar)
1	2	109.06	-0.47	-107.09	2.80	1.966	5.90
2	5	63.31	-20.80	-61.43	25.95	1.880	7.52



# Análisis de confiabilidad en el sistema propuesto después del TEP

Líneas	MHAI (Horas)
Líneas a 135 kV	38



MHAI líneas a 135 kV

Deslaste de carga



Barra	Pd [MW]	LS [MW]	Demanda atendida [MW]
1	0	0	0
2	21,7	0	21,7
3	2,4	0	2,4
4	7,6	0	7,6
5	94,2	0	94,2
6	0	0	0
7	22,8	0	22,8
8	30	0	30
9	0	0	0
10	5,8	0	5,8
11	0	0	0
12	11,2	0	11,2
13	0	0	0
14	6,2	0	6,2
15	8,2	0	8,2
16	3,5	0	3,5
17	9	0	9
18	3,2	0	3,2
19	9,5	0	9,5
20	2,2	0	2,2
21	17,5	0	17,5
22	0	0	0
23	3,2	0	3,2
24	8,7	0	8,7
25	0	0	0
26	33,5	1,5	32
27	0	0	0
28	0	0	0
29	2,4	0	2,4
30	10,6	0	10,6
<b>Total</b>	<b>313,4</b>	<b>1,5</b>	<b>311,9</b>



Energía que se espera que no sea entregada a los usuarios (ENS).



Objetivo: Comparar el sistema eléctrico, antes de la planeación y después de la planeación por medio de un análisis de confiabilidad.

Barra	LS [MW]	D [h/año]	ENS [MWh/año]
1	0	12,80	0
2	0	12,80	0
3	0	12,80	0
4	0	12,80	0
5	0	12,80	0
6	0	12,80	0
7	0	12,80	0
8	0	12,80	0
9	0	12,80	0
10	0	12,80	0
11	0	12,80	0
12	0	12,80	0
13	0	12,80	0
14	0	12,80	0
15	0	12,80	0
16	0	12,80	0
17	0	12,80	0
18	0	12,80	0
19	0	12,80	0
20	0	12,80	0
21	0	12,80	0
22	0	12,80	0
23	0	12,80	0
24	0	12,80	0
25	0	12,80	0
26	1,5	12,80	19,20
27	0	12,80	0
28	0	12,80	0
29	0	12,80	0
30	0	12,80	0
<b>TOTAL, ENS [MWh/año]</b>			<b>19,20</b>



# CONCLUSIONES

- Se realizó la investigación de todos los métodos que son aplicables a la planeación de la expansión de líneas de transmisión (TEP) con lo que se optó por utilizar un modelo idóneo que cumplía con nuestros requerimientos a corto plazo, siendo este un modelo matemático que corresponde a la planeación de la expansión de transmisión por medio de la creación de nuevas líneas a través de flujos óptimos de potencia.
- Según los datos obtenidos al realizar la planeación a corto plazo del sistema eléctrico centrándose en transmisión en el caso de estudio de la IEEE de 30 barras, se pudo apreciar con el análisis de confiabilidad mediante el índice de energía no suministrada (ENS), que el sistema inicial es confiable, arrojándonos un deslastre de carga equivalente a 0, pero al realizar la planeación y al ser necesario un incremento de carga puntual como contingencia N-1 la confiabilidad del sistema disminuyó en 19.20 MWh, lo que significa que será necesario aplicar mejoras en la topología de la red, sin embargo esto no hace referencia a que el método propuesto no mejora al sistema, debido a que un parámetro en la programación es el número de líneas que se podrá crear y en este caso se optó por dos (k2) lo que genero un deslastre de carga al tener esta limitación de creación solo de dos líneas.
- Se analizó el modelo aplicado para planeación de la expansión de líneas de transmisión (TEP) para una restricción N-1 por medio de la verificación de la seguridad en función del ángulo de voltaje en las barras, específicamente el rango de  $-\frac{\pi}{3}$  a  $\frac{\pi}{3}$ .





# RECOMENDACIONES

Analizar el criterio determinístico para calcular la confiabilidad del sistema propuesto, debido a que existen criterios determinísticos que valoran la confiabilidad del sistema a partir de reglas operativas que se obtuvo en el proyecto y criterios probabilísticos que valoran la confiabilidad del sistema a partir de índices.


Debido a que este tipo de estudios implica formulaciones matemáticas complejas al igual que varias variables y ecuaciones, se recomienda utilizar softwares capaces de realizar cálculos avanzados dándonos soluciones óptimas al menor tiempo posible adquiriendo licencias estudiantiles.

Es importante considerar que al realizar el flujo óptimo de potencia (OPF) en AC se obtendrán valores más apegados a la realidad, ya que en DC se linealizan las ecuaciones omitiendo datos de potencia reactiva al igual que datos de costos de operación..

Para el análisis de la planeación en el software GAMS es necesario contar con una computadora con características avanzadas debido a que implica un sin número de iteraciones para encontrar soluciones óptimas en el menor tiempo posible.



# Trabajos futuros



Se pretende aplicar la metodología desarrollada en el presente trabajo, en un caso real en Ecuador, el mismo que será proporcionado por el tutor a cargo y plasmado en un artículo científico. Finalizando con la publicación en una revista científica.



Gracias!



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA