

PLANEACIÓN, DISEÑO, Y OPERACIÓN ÓPTIMA DE UNA MATRIZ ENERGÉTICA REGIONAL PARA LA INTEGRACIÓN DE ENERGÍAS LIMPIAS, CASO DE ESTUDIO: PENÍNSULA DE YUCATÁN.

Ing. Ricardo Andrés Echeverri Martínez M.Sc
Candidato a Doctor



TABLA DE CONTENIDO

1

INTRODUCCIÓN

2

TÉCNICAS DE APOYO A LA TOMA DE DECISIONES EL ÁMBITO DE LAS SMART GRIDS

3

HERRAMIENTA DE SOPORTE A LA DECISIÓN MULTINIVEL

4

PLANEACIÓN, DISEÑO, Y OPERACIÓN ÓPTIMA DE UNA MATRIZ ENERGÉTICA REGIONAL. CASO DE ESTUDIO: PENÍNSULA DE YUCATÁN

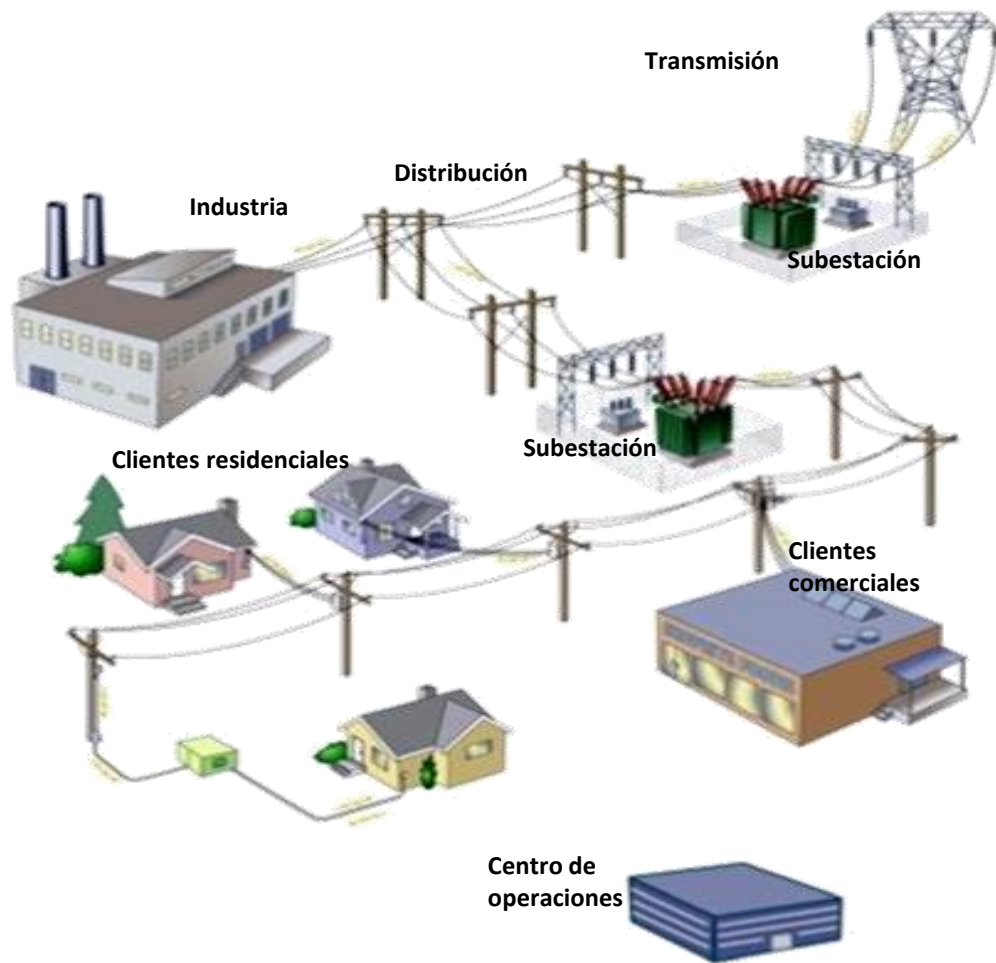
5

CONCLUSIONES



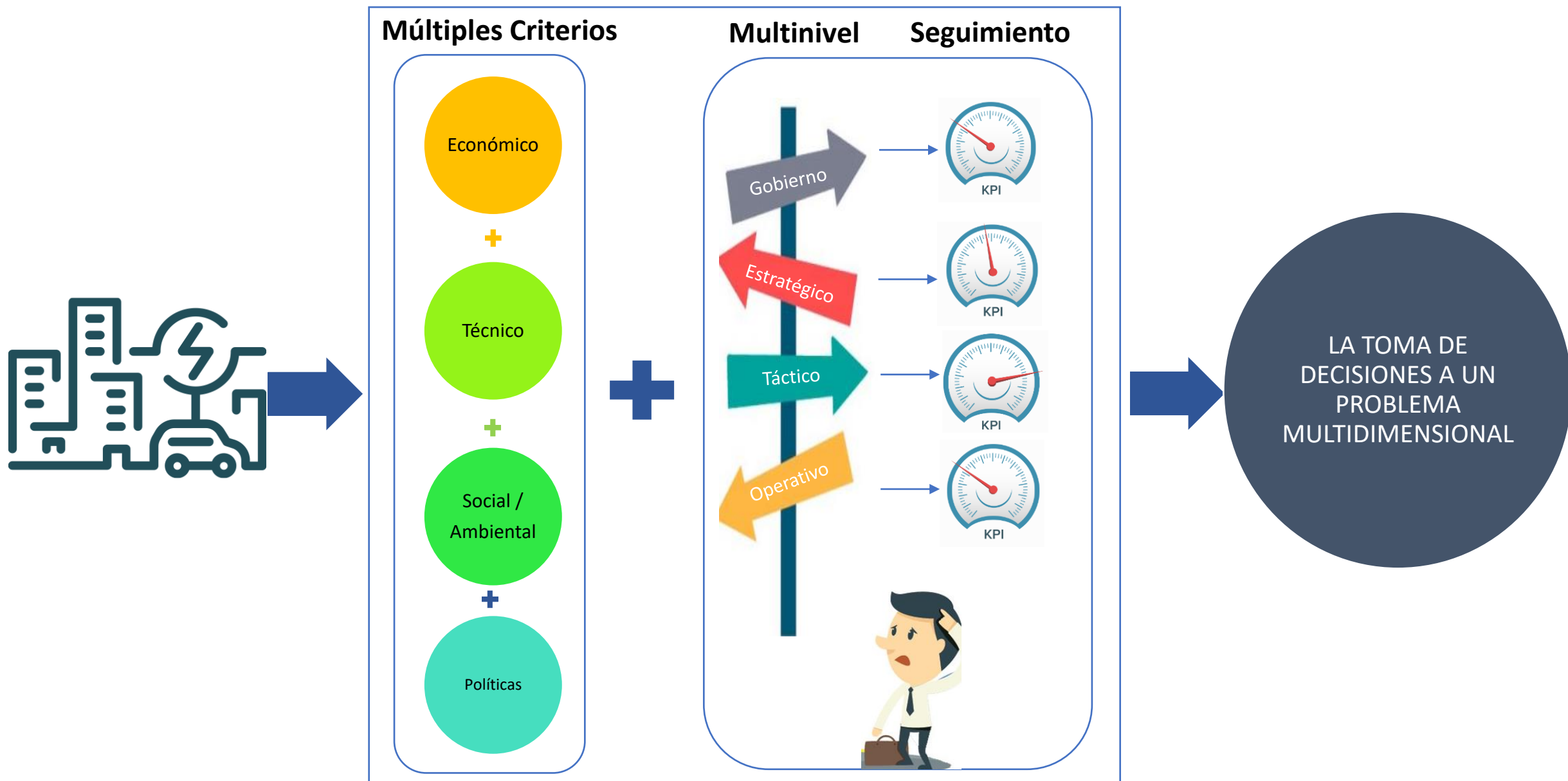
INTRODUCCIÓN

Red Eléctrica Tradicional: flujo unidireccional y generación centralizada de la energía



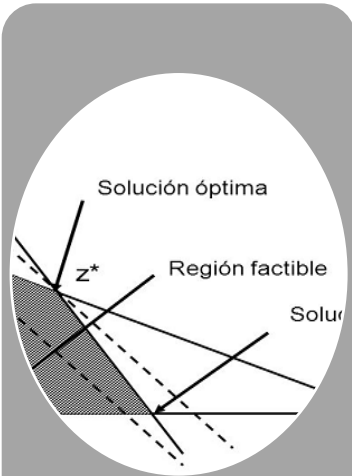
Red Eléctrica Moderna: red de flujos de potencia bidireccionales + GD FNC + un pilar de tecnologías de la información y comunicación (TICs)



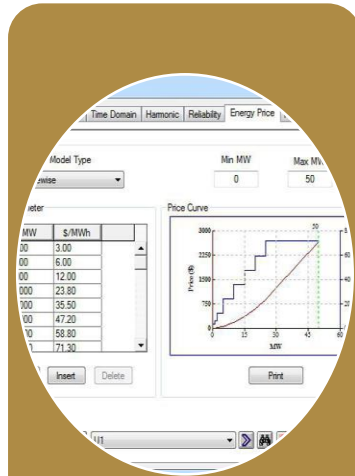




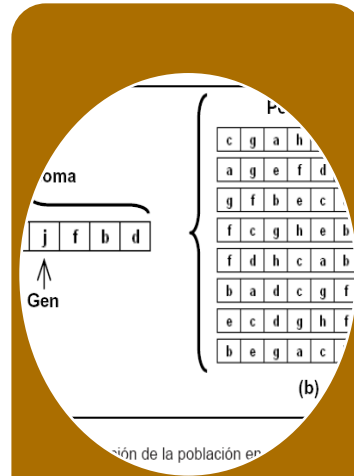
TÉCNICAS DE APOYO A LA TOMA DE DECISIONES EN EL ÁMBITO DE LAS SMART GRIDS



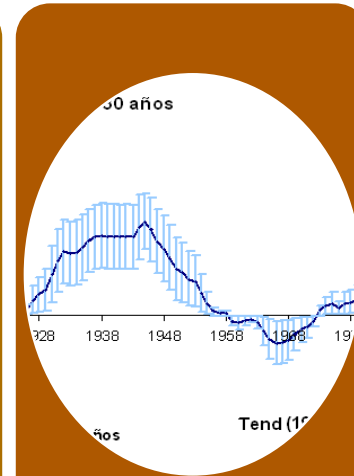
Programación lineal



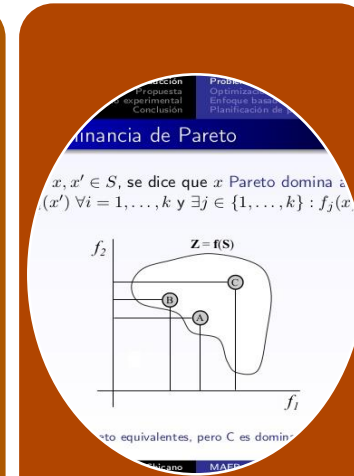
Flujo de potencia óptimo



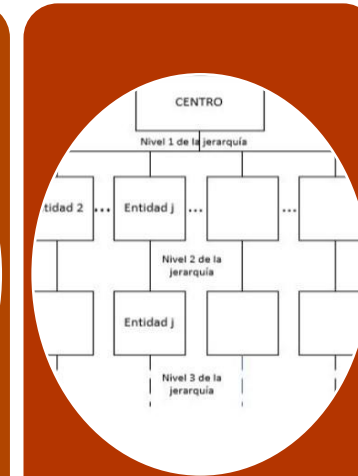
Métodos metaheurísticos



Análisis probabilístico



Programación multiobjetivo



Programación multinivel

Técnicas de apoyo a la toma de decisiones a nivel organizacional para la planeación de proyectos de RIE

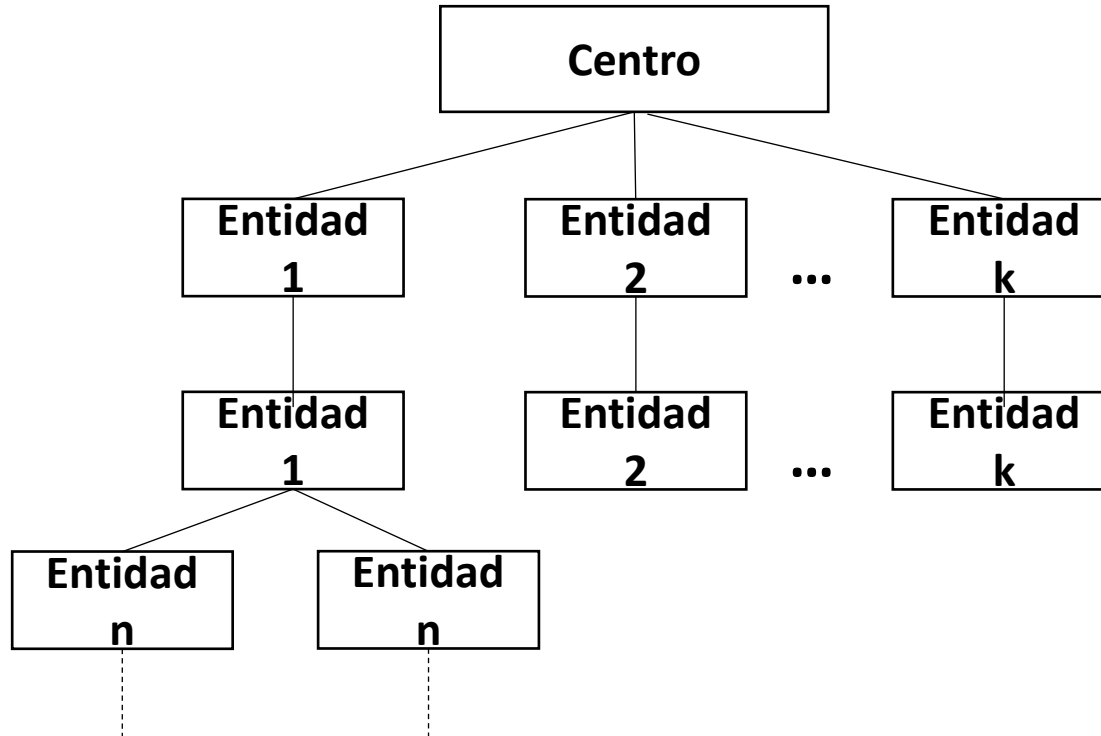
Toma de decisión multinivel

Nivel 1 de
la Jerarquía

Nivel 2 de
la Jerarquía

Nivel 3 de
la Jerarquía

Nivel n de
la Jerarquía



Características:

- Resuelve problemas de planeación con tomadores de decisiones en sistemas jerárquicos.
- Atiende problemas de decisión NP-Hard de naturaleza no convexa.
- Permite ejecución de las decisiones de manera secuencial (nivel superior al inferior)
- Las entidades de decisión en el nivel superior y el nivel inferior se denominan líder y seguidor.
- Permite considerar las acciones de tomadores de decisión en cada nivel. (maximización o minimización de objetivos)

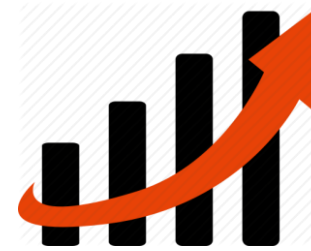
INDICADORES CLAVES DE DESEMPEÑO



OBJETIVOS



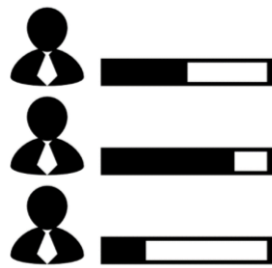
ESTRATEGIA



OPTIMIZACIÓN



MEDICIÓN



DESEMPEÑO

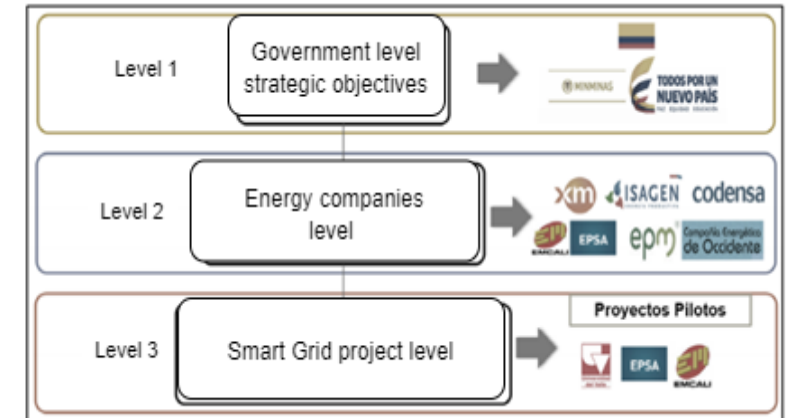
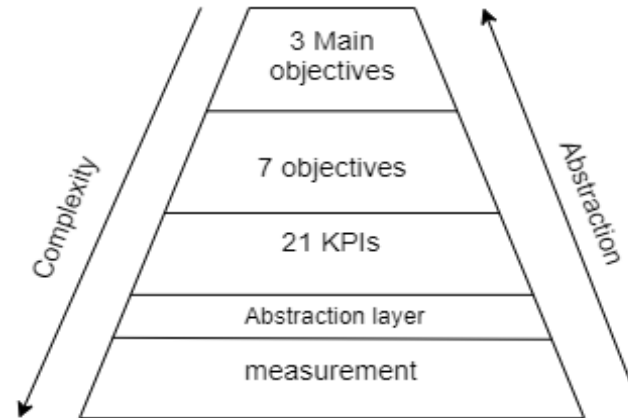
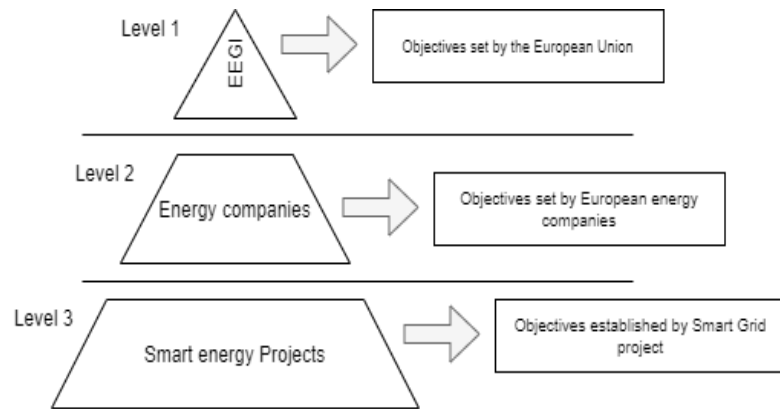
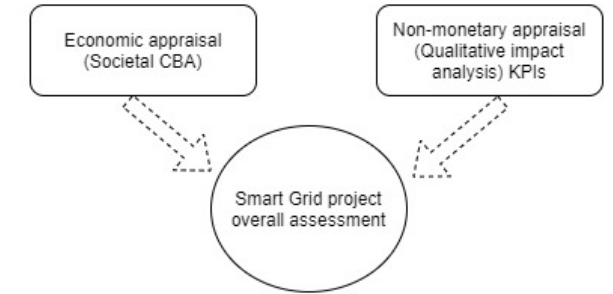
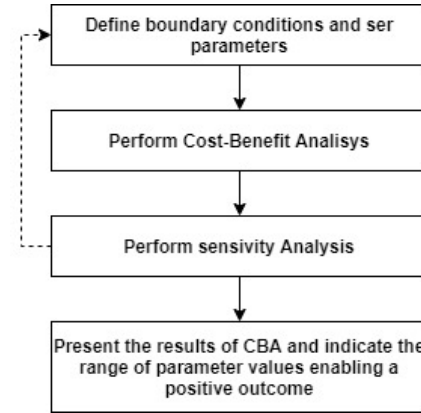
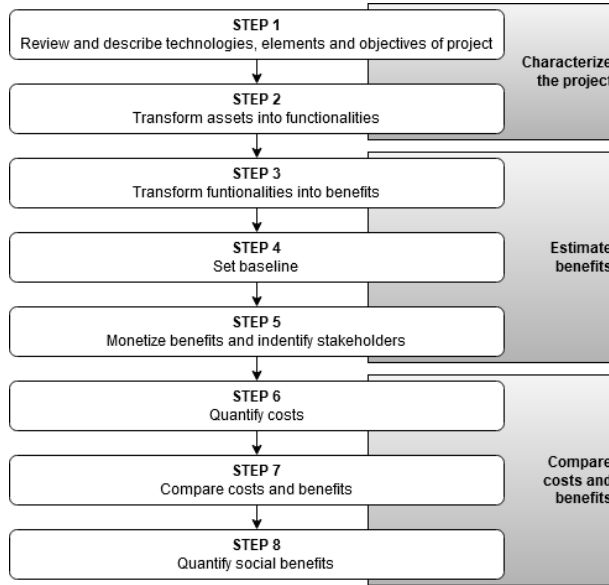


EVALUACIÓN



ÉXITO

Trabajos relacionados



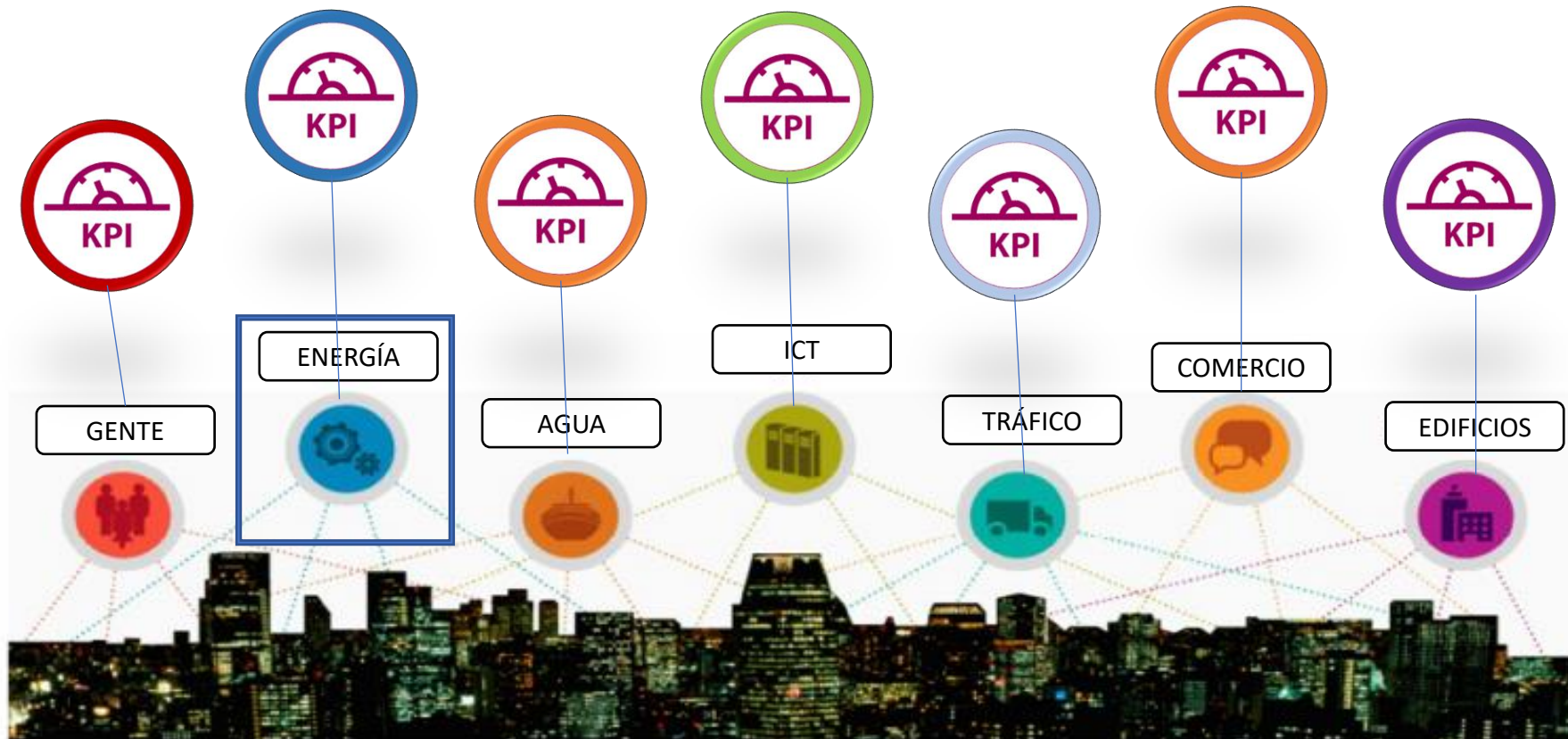
Una ciudad es una red compleja de sistemas (System of Systems)...



Key Performance Indicators (KPIs) and Standards for Smart Sustainable Cities



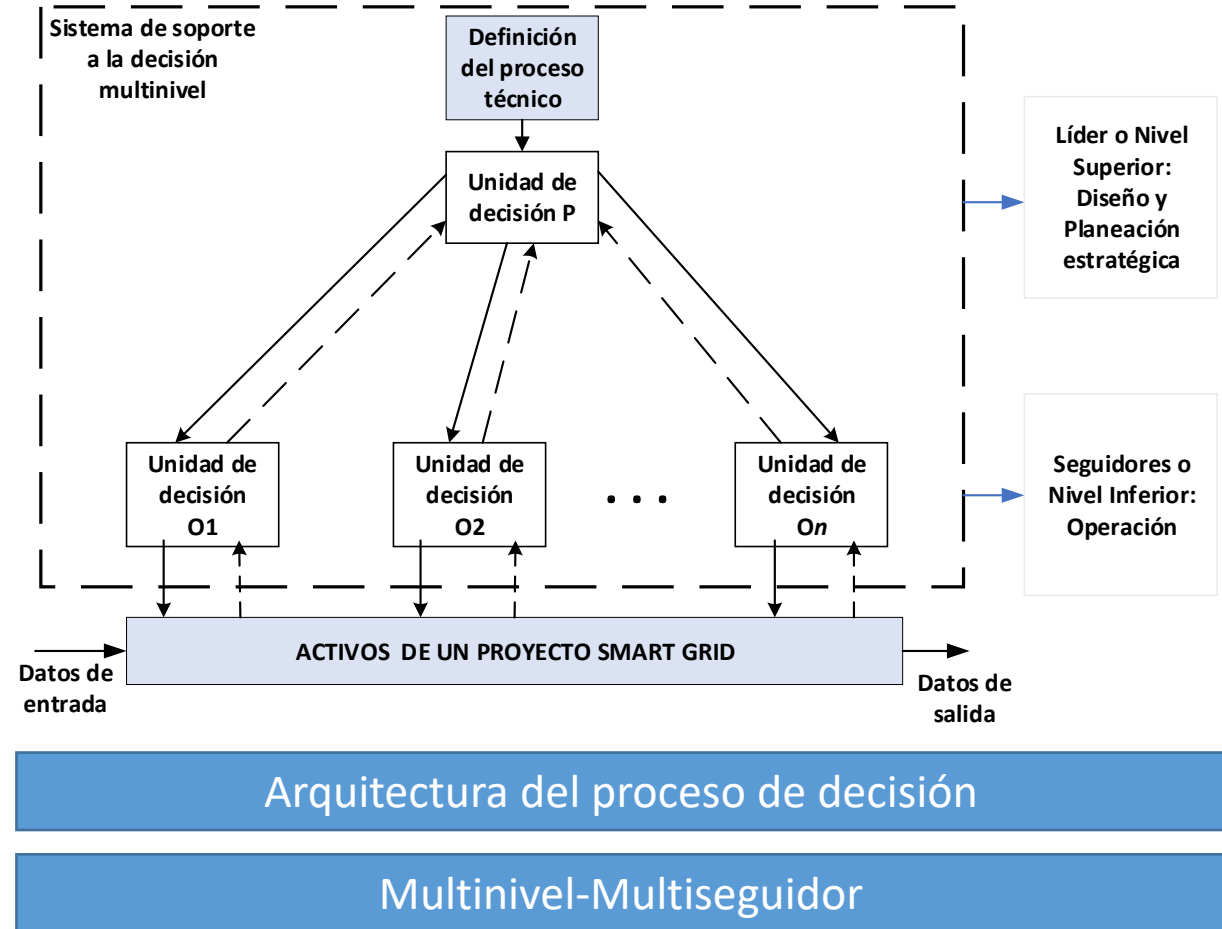
Sustainable cities and communities -- Indicators for city services and quality of life



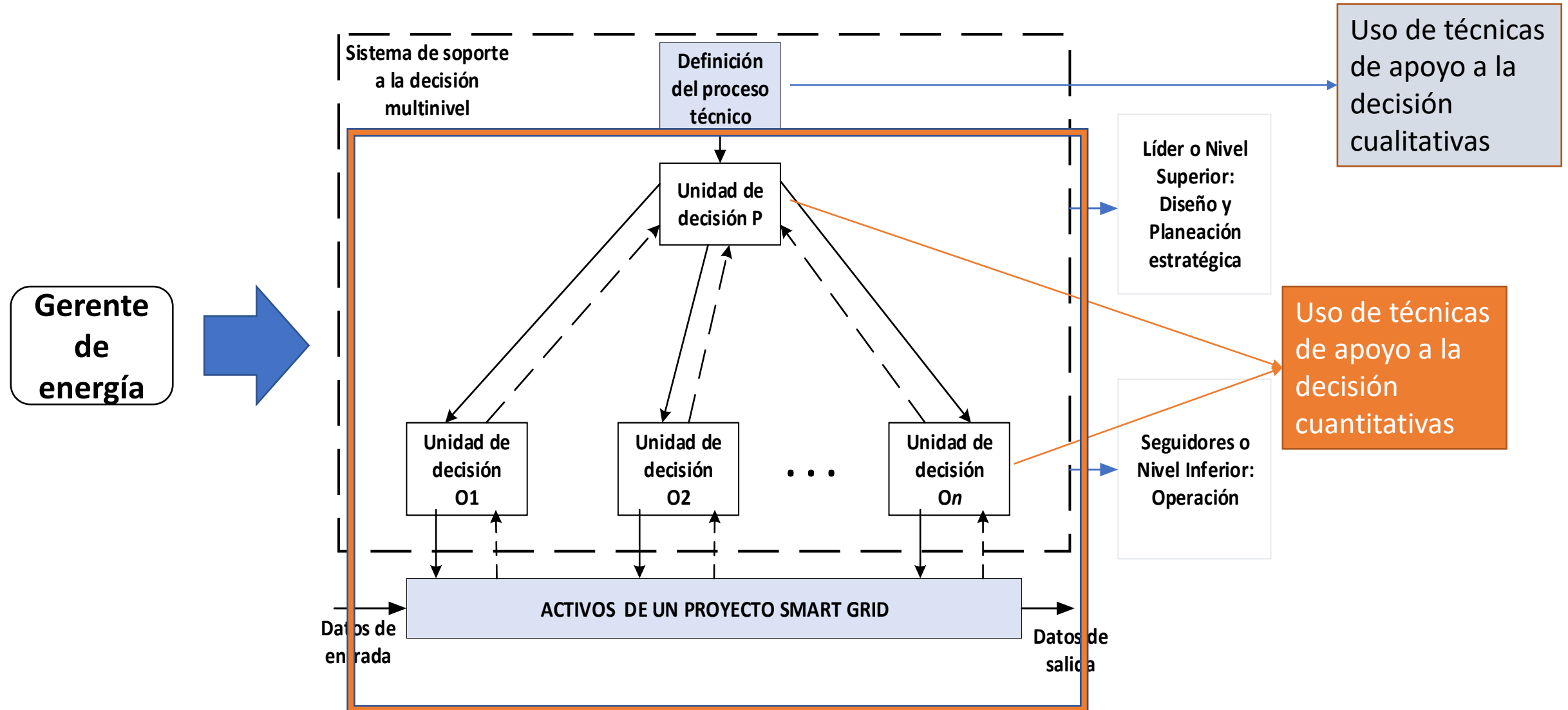


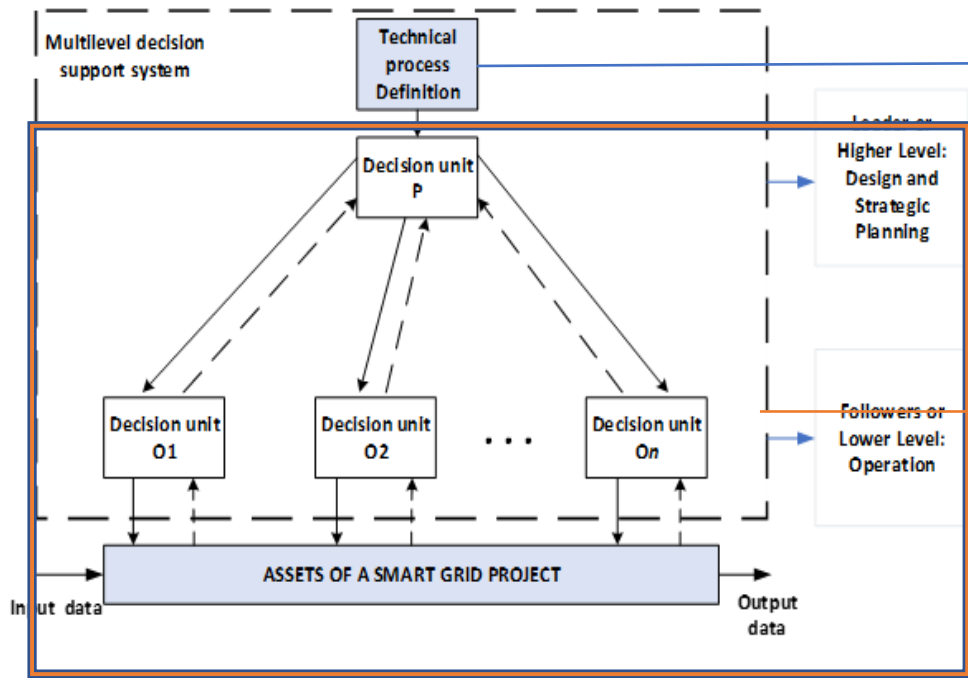
HERRAMIENTA DE SOPORTE A LA DECISIÓN

Toma de decisiones descentralizada



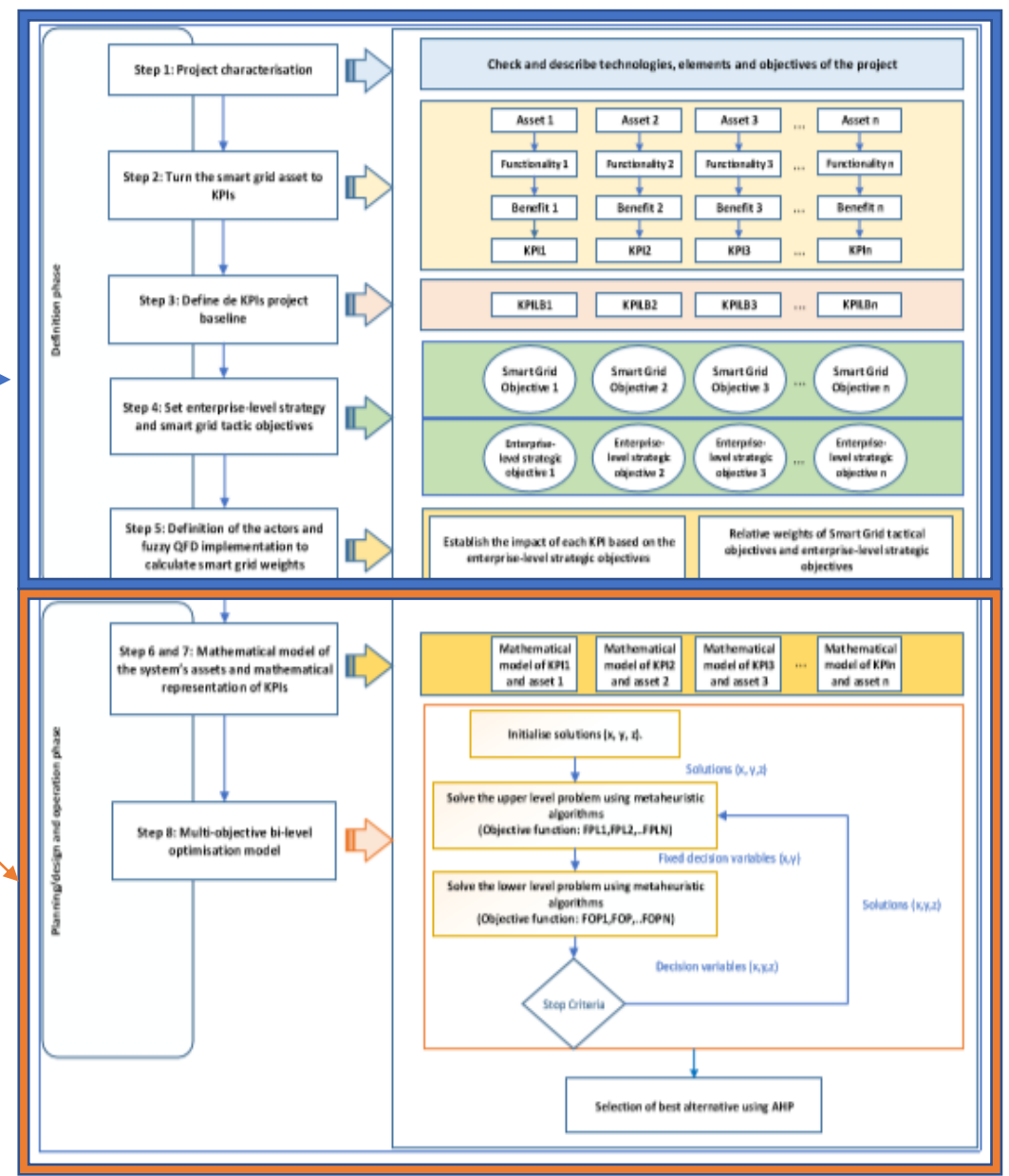
Toma de decisiones descentralizada: marco propuesto





Use of qualitative decision support techniques

Use of quantitative decision support techniques

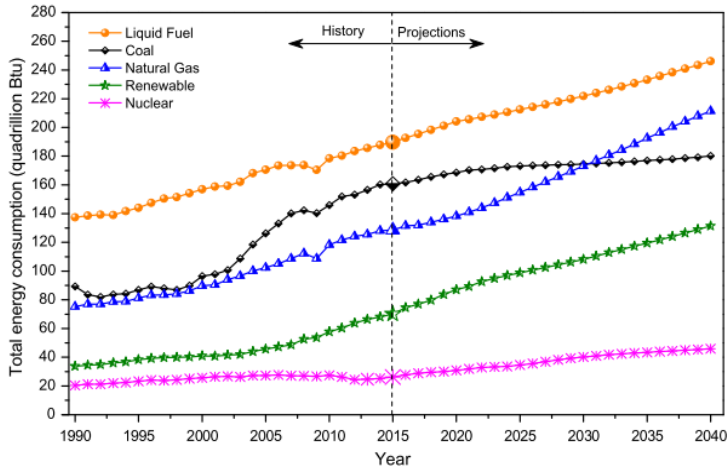




CASO DE ESTUDIO

CONTEXTO

+ 62% → 2050



Fuente: EIA

+ 75%



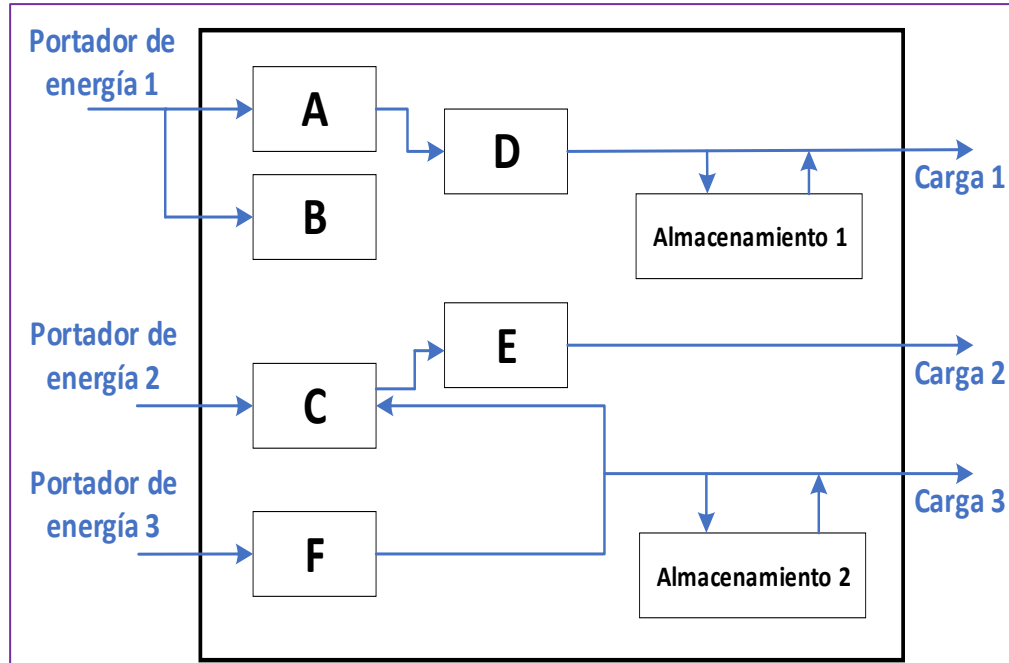
Impacto
Negativo



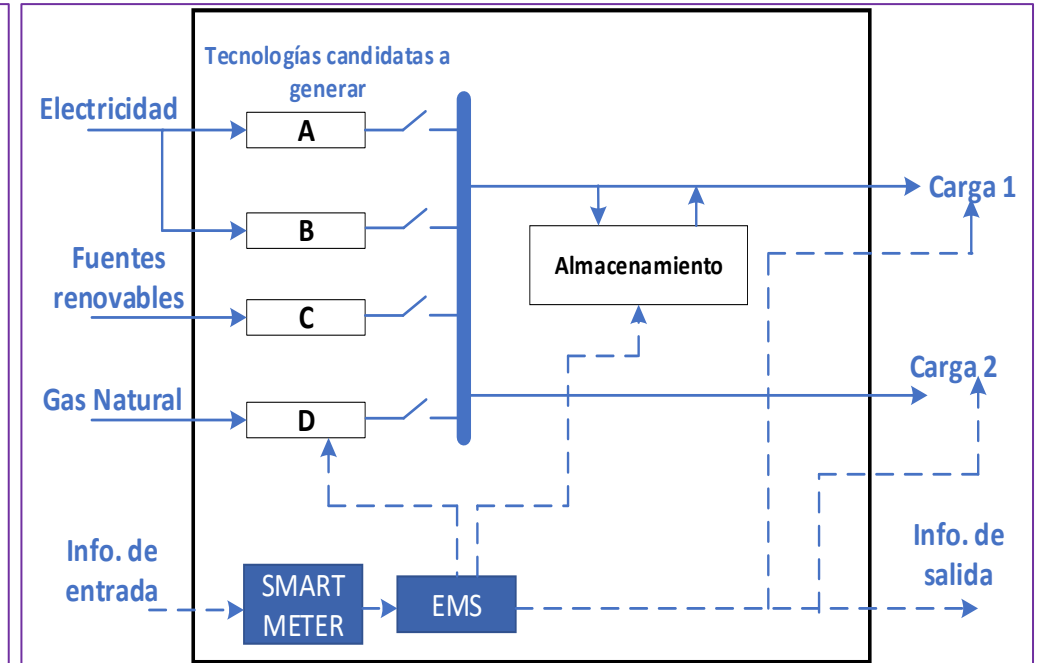
Zonas
Urbanas



CONCEPTO ENERGY HUB (EH)

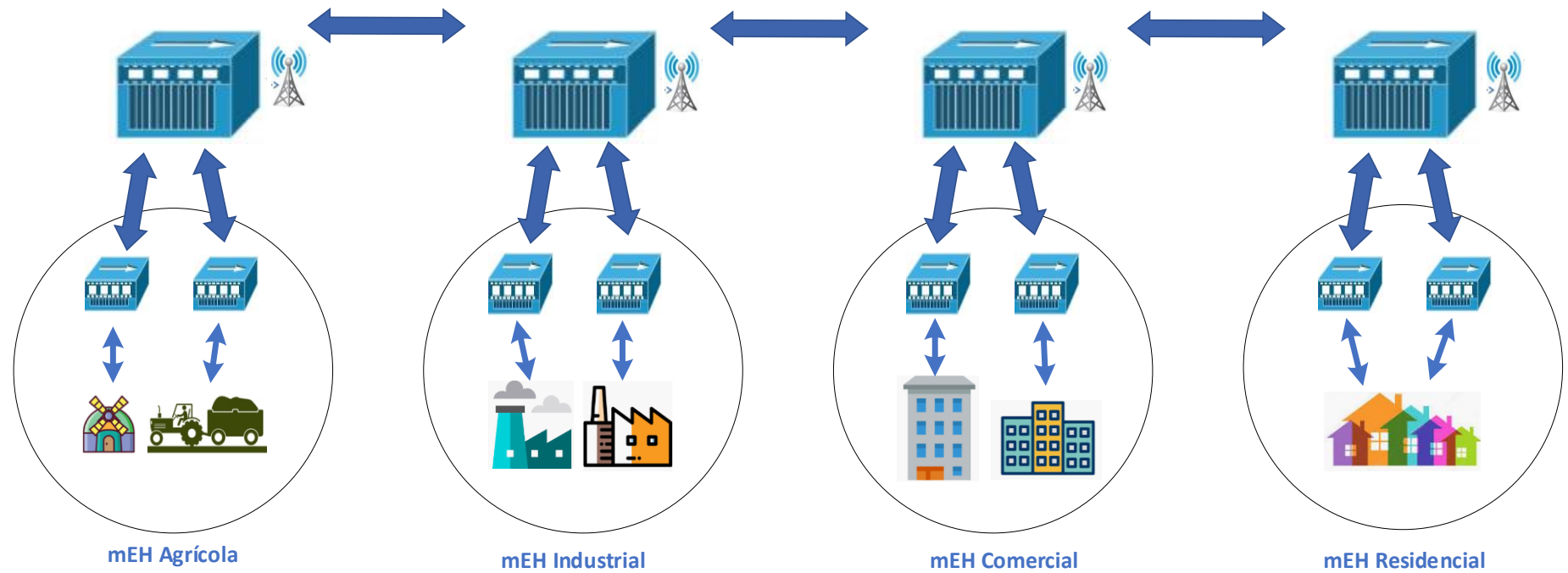


Energy Hub Tradicional



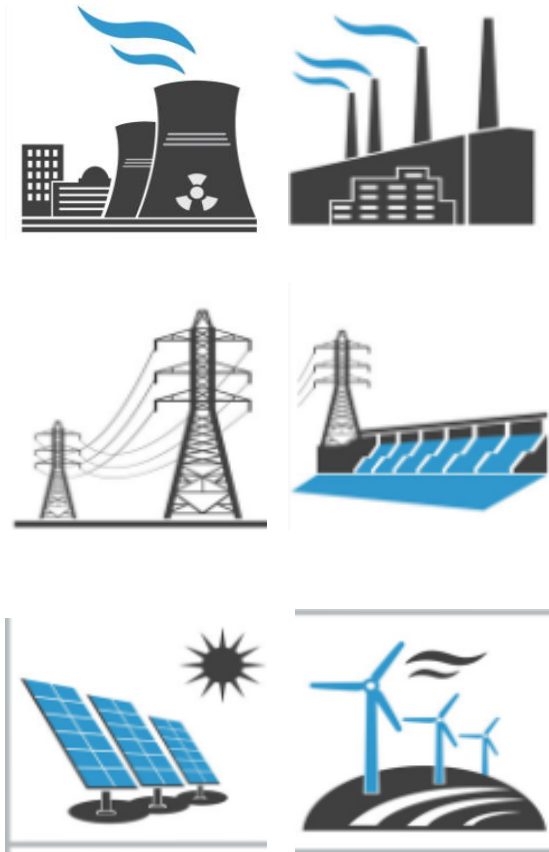
Smart Energy Hub

CONCEPTO ENERGY HUB



Macro Energy Hub

Planeación y Operación de los EHs



Objetivos

- Minimización del costo
- Maximización de las ganancias netas de la empresa
- Maximización de la satisfacción del cliente



A largo plazo: planeación óptima (años)

A corto plazo: optimización operativa (días)



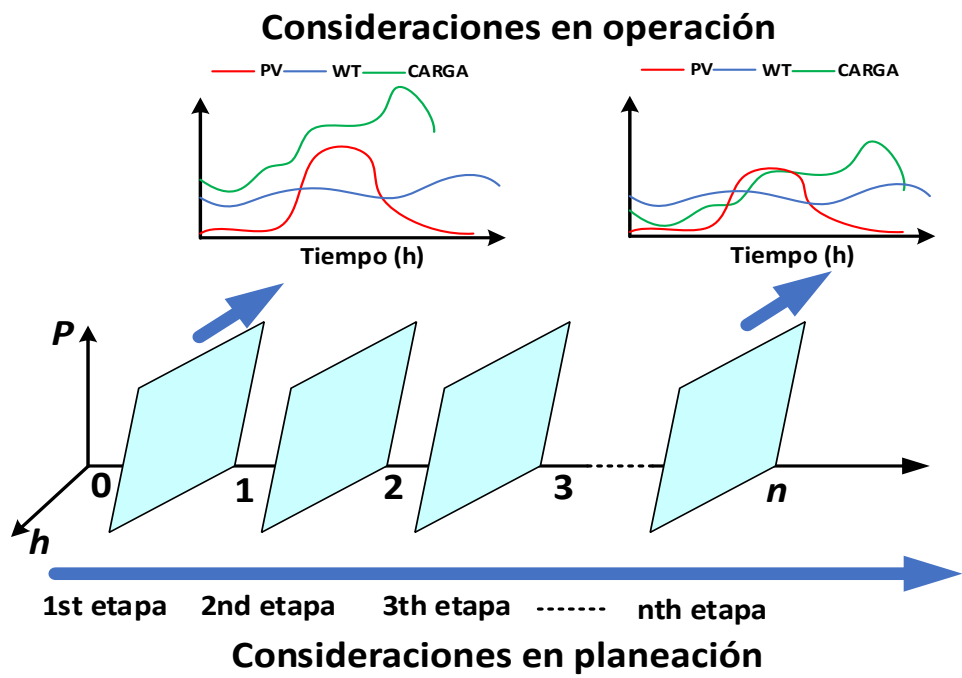
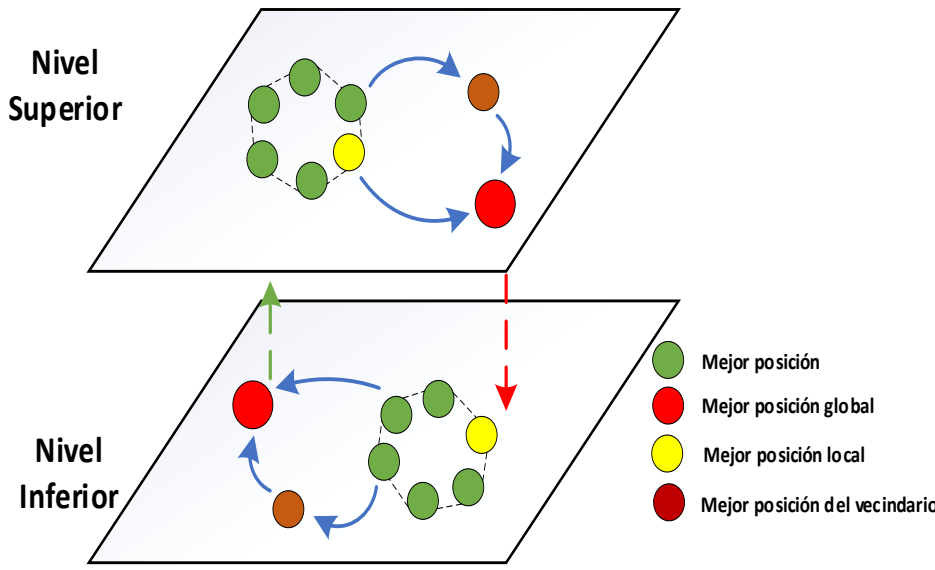
Objetivos

- Minimización de emisiones
- Minimización del consumo de energía
- Maximización de la calidad del suministro

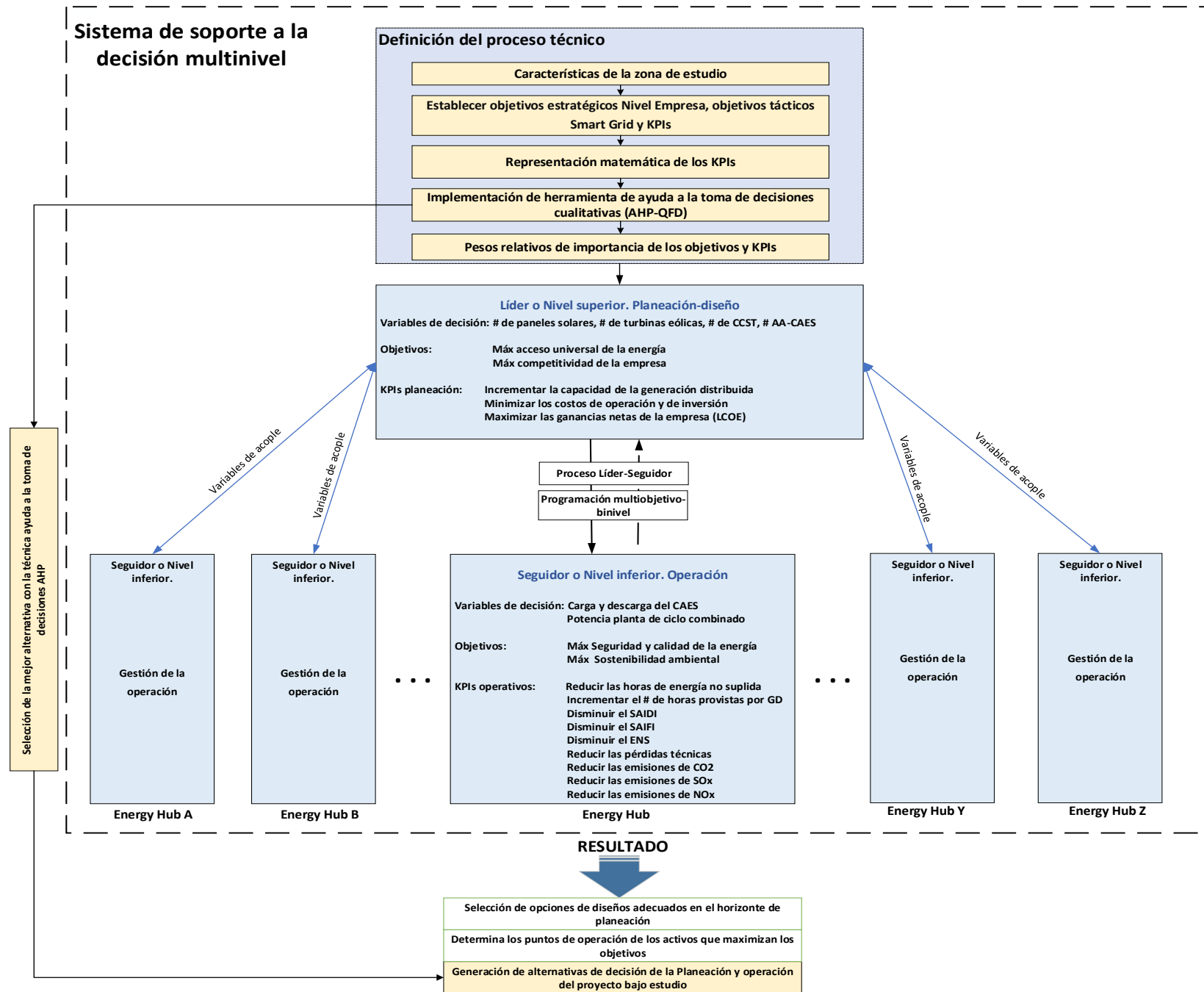
Planeación y Operación de los EHs

Referencia	Función objetivo	Horizonte	Método de solución
[30]	Minimización de costos de energía	Operación (un día)	GAMS
[16]	Minimización de costos y emisiones	Operación (un día)	GAMS
[31]	Minimización de costos de energía, consumo energético, carga pico y emisiones	Operación (un día)	GAMS
[32]	Minimización de costos y pérdidas	Operación (un día)	Método del logro de objetivo
[33]	Minimización de los costos de energía del sistema y el costo de capital de la estación de repostaje de hidrógeno.	Planeación (un año)	GAMS
[34]	Maximización de las ganancias de las empresas de servicios públicos y minimización del costo de consumo de los clientes.	Operación (un día)	--
[35]	Minimización de costos de energía y costos de inversión.	Planeación (10 años)	GAMS
[36]	Minimización de los costos de energía y el nivel de insatisfacción de los clientes.	Operación	Aprendizaje por refuerzo
[37]	Minimización de los costos de inversión y operación.	Planeación (15 años)	GAMS
[38]	Minimizar los costos de inversión, operación y emisiones y maximizar la confiabilidad	Planeación (20 años)	GAMS
[39]	Minimización de los costos de energía	Operación (un día)	GAMS
[40]	Minimización del costo de energía	Operación (un día)	GAMS
[41]	Minimizar el costo de operación esperado del EH	Operación (un día)	GAMS
[42]	Minimización de los costos de energía	Operación (un día)	GAMS
[43]	Minimización de los costos de energía	Operación (un día)	Equilibrio de Nash
[38]	Minimizar costos de inversión, operación, confiabilidad y emisiones	Planeación (20 años)	GAMS
[44]	Minimizar los costos de operación y de inversión	Operación (Un día)	Método Big M
[33]	Minimizar el costo capital de las estaciones de repostaje de hidrógeno y el costo de operación y mantenimiento de todos los EH dentro de la red.	Planeación y operación (un año/un día)	GAMS
[45]	Minimizar los costos de inversión y operación	Planeación y operación (20 y 15 años/ un día)	GAMS
[46]	Minimizar los costos de inversión y operación	Planeación (30 años)	Método de agrupamiento K-medias
[47]	Minimización de costos de energía	Operación (un día)	GAMS
[48]	Minimizar el costo de energía y pérdidas y el costo	Operación (un día)	Aprendizaje auto-adoptivo con tiempo variable. Coeficiente de aceleración-Gravitacional
[6]	Minimizar los costos de inversión y operación y emisiones	Planeación y operación (20 años/ un día)	Restricción épsilon
Propuesta	<ul style="list-style-type: none"> Maximizar el acceso universal de la energía Maximizar la competitividad Maximizar la calidad y seguridad del suministro Maximizar la sostenibilidad medioambiental. 	Planeación / Operación (30 años / 2 días)	Optimización por enjambre de partículas

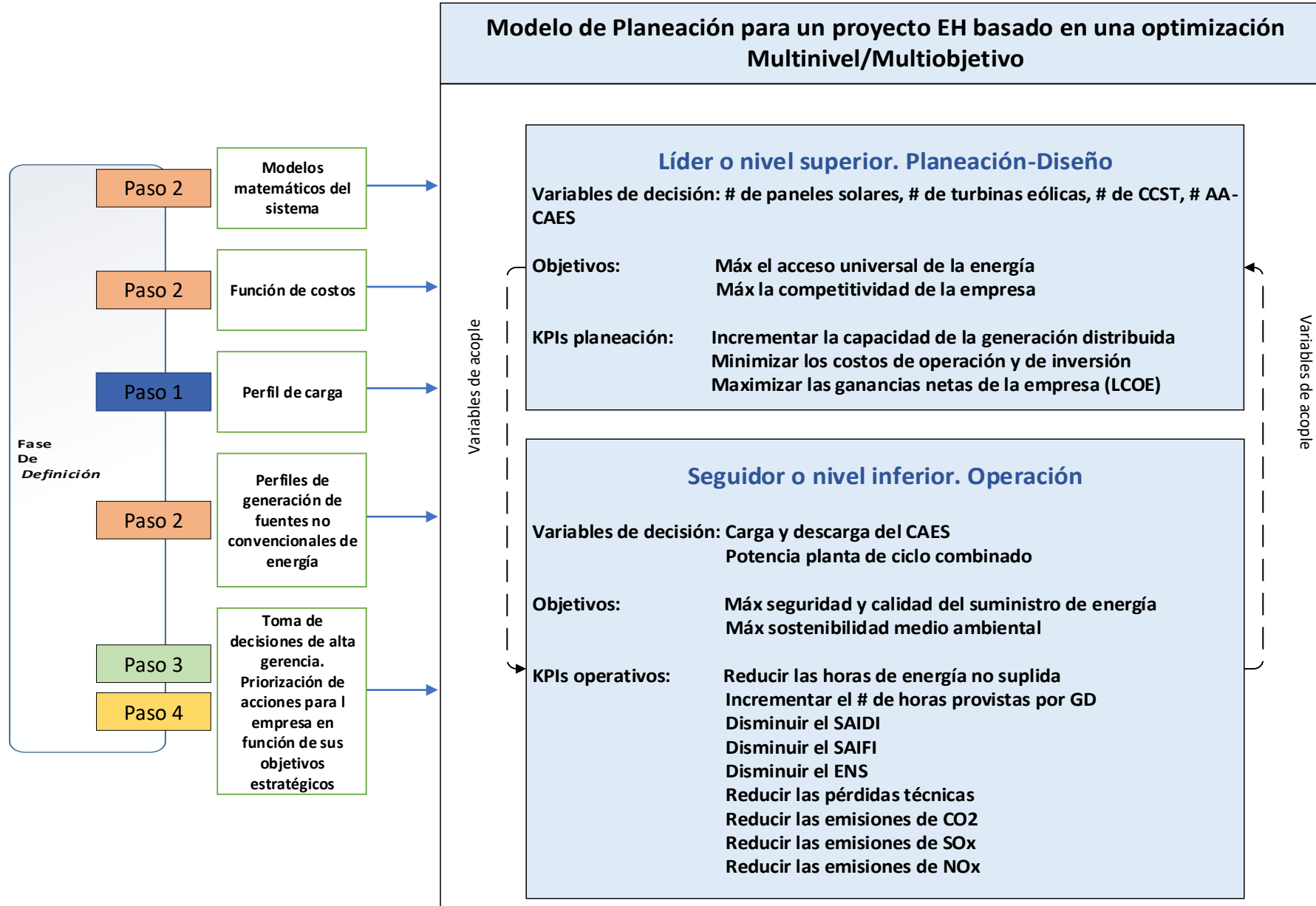
Enfoque Multinivel para la planeación y operación de EHs



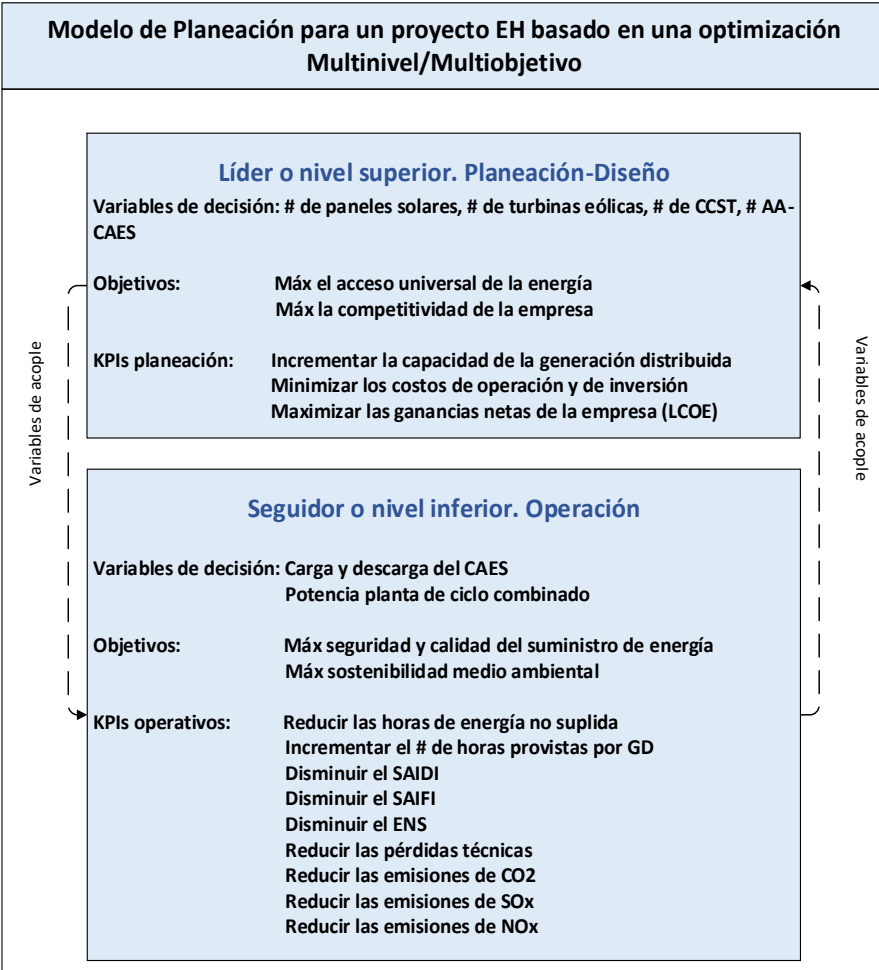
MODELO GENERAL



Nivel de planeación-diseño y operación



Modelamiento matemático considerado para el desarrollo del EH.



A. Modelos matemáticos de los activos del sistema

Modelo general turbina eólica

$$P_{WT} = \begin{cases} P_R * \frac{V - V_C}{V_R - V_C} & V_C \leq V \leq V_R \\ P_R & V_R \leq V \leq V_F \\ 0 & V < V_C \text{ ó } V > V_F \end{cases}$$

B. Modelos matemáticos de los KPIs

Disminuir el SAIDI

$$KPI_4 = SAIDI = \frac{\sum_{i=1}^n U * N_u}{N_{uTot}}$$

Minimizar las emisiones de CO₂

$$KPI_{10} = E_T = N_{PV} * P_{PV}^M * E_C^{PV} + N_{wt} * P_{wt}^M * E_c^{wt} + E_{CCPP}^{CO_2} * \sum_{t=1}^T P_{CCPP}(t)$$

C. Modelo matemático de las funciones objetivos

$$\max F(P_{CCPP}, C_{CAES}, N_{PV}, N_{WT}, N_{CCPP}, N_{CAES}) = [F_{AU}, F_{Comp}]$$

$$s. t. \begin{cases} G(N_{PV}, N_{WT}, N_{CCPP}, N_{CAES}) = 0 \\ H(N_{PV}, N_{WT}, N_{CCPP}, N_{CAES}) \leq 0 \end{cases}$$

Donde, P_{CCPP}, C_{CAES} se obtienen de:

$$\max f(P_{PV}, P_{WT}, P_{CCPP}, C_{CAES}, N_{PV}, N_{WT}, N_{CCPP}, N_{CAES}) = [f_S, f_S]$$

$$s. t. \begin{cases} g(P_{CCPP}, C_{CAES}) = 0 \\ h(P_{CCPP}, C_{CAES}) \leq 0 \end{cases}$$

Modelamiento matemático considerado para el desarrollo del EH.

Acceso universal de la energía

$$F_{AU} = Q_{211} * \frac{-(KPI1 - KPI1_{BS})}{KPI1_{BS}} + Q_{212} * \frac{(KPI2 - KPI2_{BS})}{KPI2_{BS}} + Q_{213} * \frac{-(KPI3 - KPI3_{BS})}{KPI3_{BS}} + Q_{214} * \frac{(KPI4 - KPI4_{BS})}{KPI4_{BS}}$$

$$+ Q_{215} * \frac{(KPI5 - KPI5_{BS})}{KPI5_{BS}} + Q_{216} * \frac{(KPI6 - KPI6_{BS})}{KPI6_{BS}} + Q_{217} * \frac{(KPI7 - KPI7_{BS})}{KPI7_{BS}} + Q_{218}$$

$$* \frac{(KPI8 - KPI8_{BS})}{KPI8_{BS}} + Q_{219} * \frac{(KPI9 - KPI9_{BS})}{KPI9_{BS}} + Q_{2110} * \frac{(KPI10 - KPI10_{BS})}{KPI10_{BS}} + Q_{2111}$$

$$* \frac{(KPI11 - KPI11_{BS})}{KPI11_{BS}} + Q_{2112} * \frac{(KPI12 - KPI12_{BS})}{KPI12_{BS}}$$

Competitividad de la organización

$$F_{COMP} = Q_{221} * \frac{-(KPI1 - KPI1_{BS})}{KPI1_{BS}} + Q_{222} * \frac{(KPI2 - KPI2_{BS})}{KPI2_{BS}} + Q_{223} * \frac{-(KPI3 - KPI3_{BS})}{KPI3_{BS}} + Q_{224} * \frac{(KPI4 - KPI4_{BS})}{KPI4_{BS}}$$

$$+ Q_{225} * \frac{(KPI5 - KPI5_{BS})}{KPI5_{BS}} + Q_{226} * \frac{(KPI6 - KPI6_{BS})}{KPI6_{BS}} + Q_{227} * \frac{(KPI7 - KPI7_{BS})}{KPI7_{BS}} + Q_{228}$$

$$* \frac{(KPI8 - KPI8_{BS})}{KPI8_{BS}} + Q_{229} * \frac{(KPI9 - KPI9_{BS})}{KPI9_{BS}} + Q_{2210} * \frac{(KPI10 - KPI10_{BS})}{KPI10_{BS}} + Q_{2211}$$

$$* \frac{(KPI11 - KPI11_{BS})}{KPI11_{BS}} + Q_{2212} * \frac{(KPI12 - KPI12_{BS})}{KPI12_{BS}}$$

Seguridad y calidad del suministro

$$f_{SC} = Q_{231} * \frac{-(KPI1 - KPI1_{BS})}{KPI1_{BS}} + Q_{232} * \frac{(KPI2 - KPI2_{BS})}{KPI2_{BS}} + Q_{233} * \frac{-(KPI3 - KPI3_{BS})}{KPI3_{BS}} + Q_{234} * \frac{(KPI4 - KPI4_{BS})}{KPI4_{BS}}$$

$$+ Q_{235} * \frac{(KPI5 - KPI5_{BS})}{KPI5_{BS}} + Q_{236} * \frac{(KPI6 - KPI6_{BS})}{KPI6_{BS}} + Q_{237} * \frac{(KPI7 - KPI7_{BS})}{KPI7_{BS}} + Q_{238}$$

$$* \frac{(KPI8 - KPI8_{BS})}{KPI8_{BS}} + Q_{239} * \frac{(KPI9 - KPI9_{BS})}{KPI9_{BS}} + Q_{2310} * \frac{(KPI10 - KPI10_{BS})}{KPI10_{BS}} + Q_{2311}$$

$$* \frac{(KPI11 - KPI11_{BS})}{KPI11_{BS}} + Q_{2312} * \frac{(KPI12 - KPI12_{BS})}{KPI12_{BS}}$$

Sostenibilidad

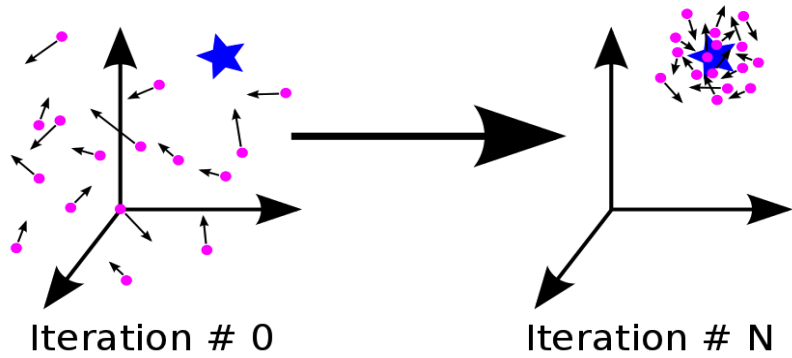
$$f_S = Q_{241} * \frac{-(KPI1 - KPI1_{BS})}{KPI1_{BS}} + Q_{242} * \frac{(KPI2 - KPI2_{BS})}{KPI2_{BS}} + Q_{243} * \frac{-(KPI3 - KPI3_{BS})}{KPI3_{BS}} + Q_{244} * \frac{(KPI4 - KPI4_{BS})}{KPI4_{BS}}$$

$$+ Q_{245} * \frac{(KPI5 - KPI5_{BS})}{KPI5_{BS}} + Q_{246} * \frac{(KPI6 - KPI6_{BS})}{KPI6_{BS}} + Q_{247} * \frac{(KPI7 - KPI7_{BS})}{KPI7_{BS}} + Q_{248}$$

$$* \frac{(KPI8 - KPI8_{BS})}{KPI8_{BS}} + Q_{249} * \frac{(KPI9 - KPI9_{BS})}{KPI9_{BS}} + Q_{2410} * \frac{(KPI10 - KPI10_{BS})}{KPI10_{BS}} + Q_{2411}$$

$$* \frac{(KPI11 - KPI11_{BS})}{KPI11_{BS}} + Q_{2412} * \frac{(KPI12 - KPI12_{BS})}{KPI12_{BS}}$$

ALGORITMO DE SOLUCIÓN



BASADO EN OPTIMIZACIÓN
POR ENJAMBRE DE
PARTÍCULAS



CASO DE ESTUDIO – Península de Yucatán

Área de estudio



¿POR QUÉ?

PROPÓSITO

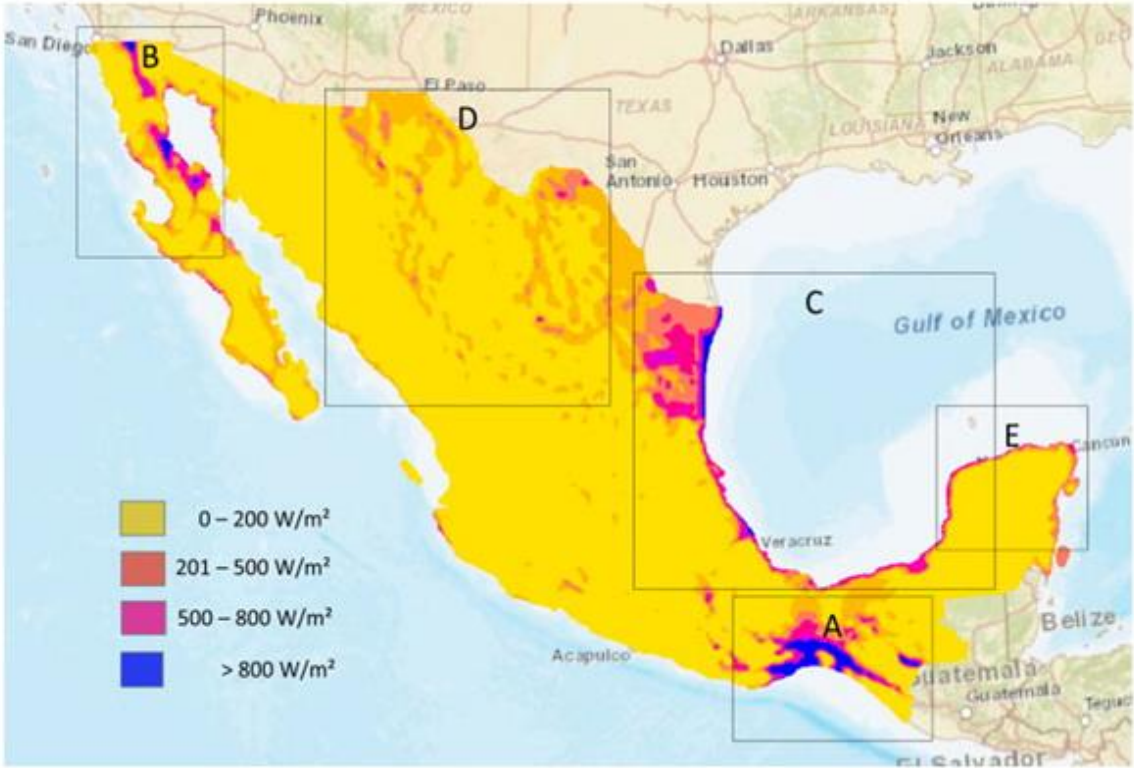
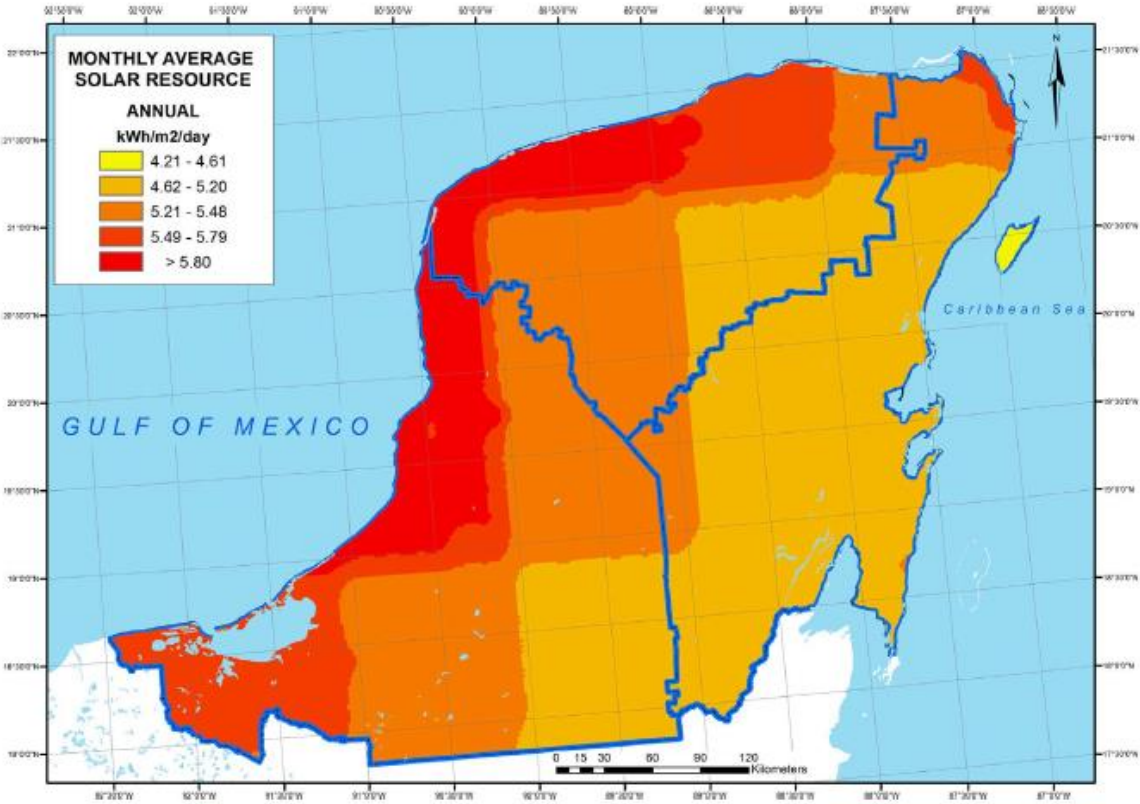
El gobierno peninsular ha mostrado un **alto interés** en la implementación de **energías renovables**, deseando ser una de **zonas pioneras en autosuficiencia energética del país** con la instalación masiva de **proyectos de generación eólica y fotovoltaica**.

DESAFÍOS

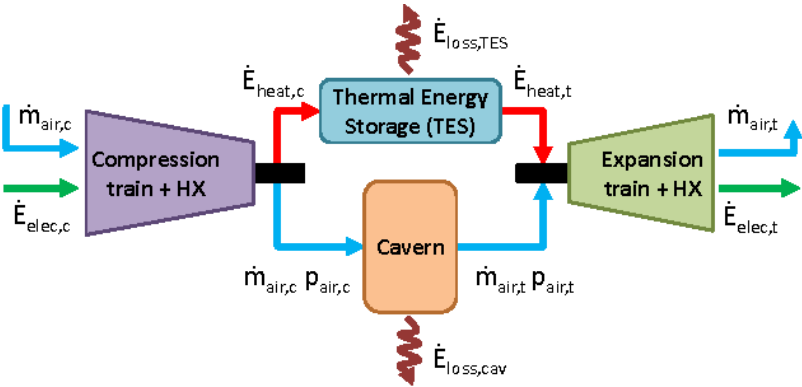
Una alta dependencia a la generación de electricidad de otras zonas del país, pues produce, en promedio, la mitad de la energía que requiere. Esto ha traído inconvenientes debido a que la demanda de electricidad supera a la capacidad de generación local.

CASO DE ESTUDIO – Alto potencial solar y eólico

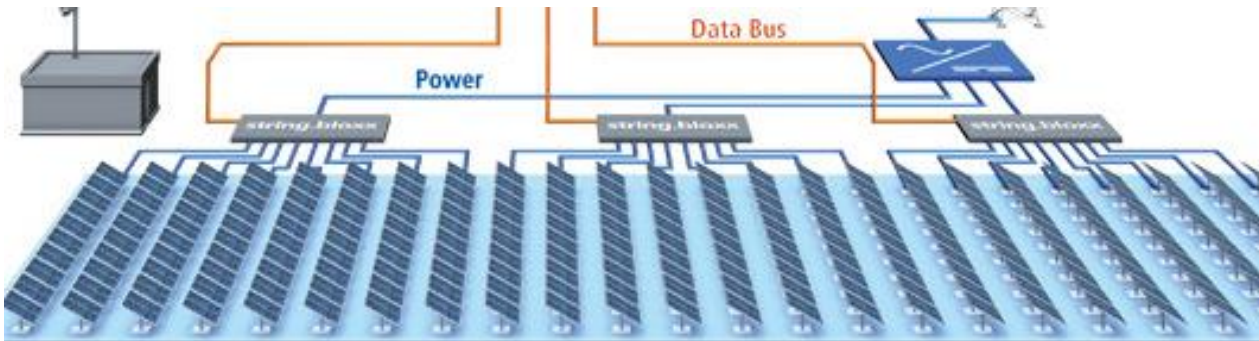
POTENCIAL SOLAR ENTRE 4.62 Y 5.79 kWh/m²/Día y potencial EÓLICO entre 500 y 800 W/m²



CASO DE ESTUDIO - Activos considerados en el estudio



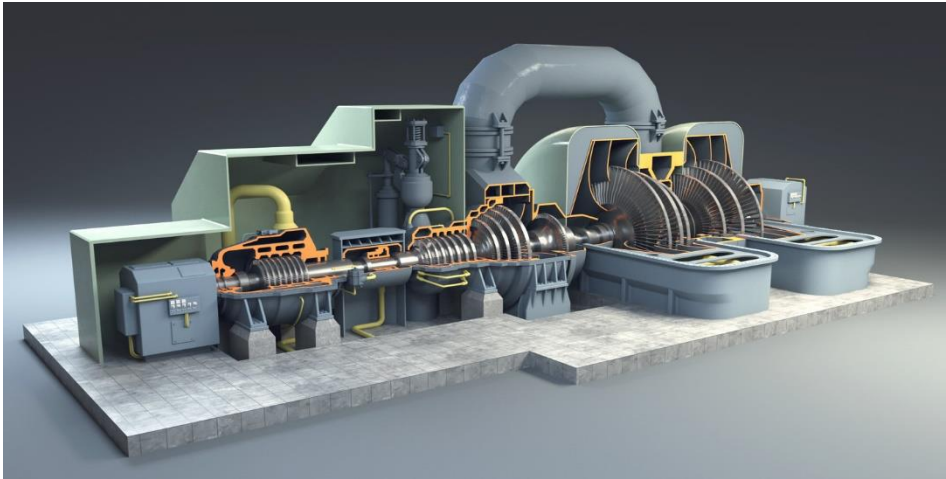
Sistemas de almacenamiento AA-CAES (210 MW)



Parque solar fotovoltaico (295W)



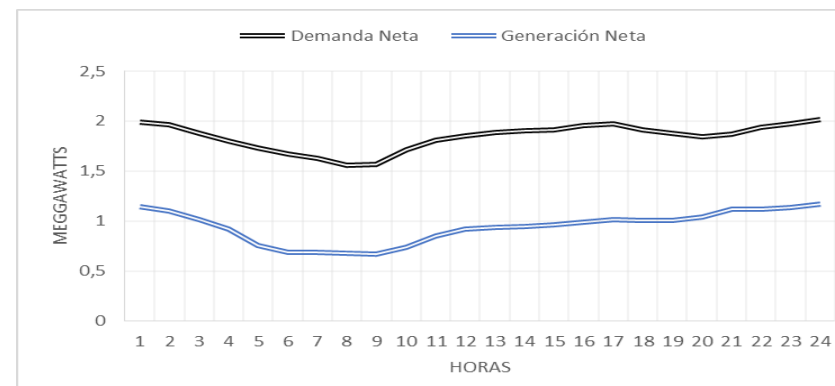
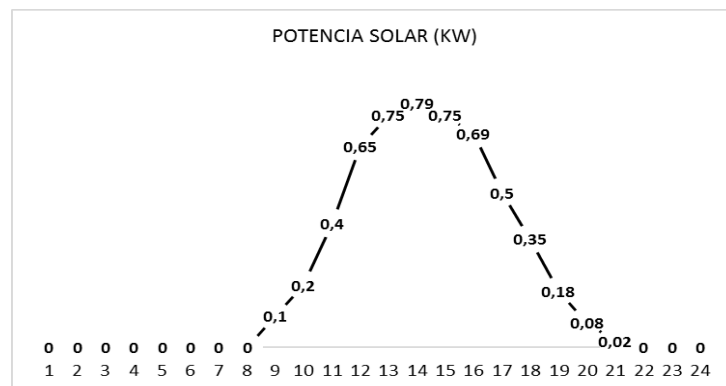
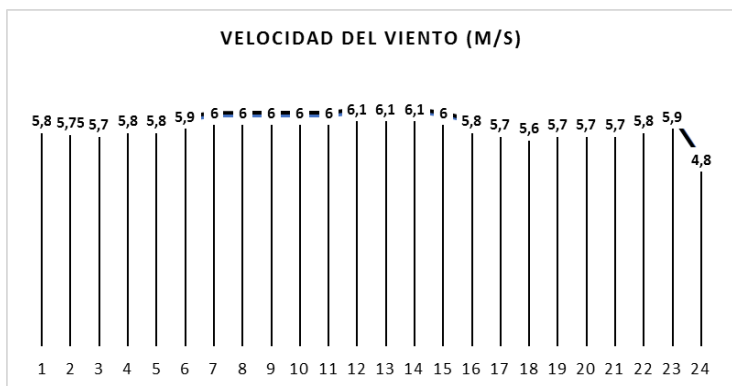
Parque eólico 2MW por turbina



Generador de ciclo combinado (400 MW)

Adquisición y procesamiento de datos

Datos base	Referencia
Potencia Base de fuentes renovables y no renovables en la Península SAIDI, ENS, pérdidas técnicas y número de usuarios.	Tomado de: PRODESEN 2019-2033: "Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional" y de Inventario Nacional de Energías Limpias
	Tomado de: Programa de Ampliación y Modernización de las Redes Generales de Distribución 2018-2032.



Costos

Nombre	Valor	Unidad	Descripción
C_{CAES}	30'060.000	USD	Costo de inversión del CAES
C_{PV}	158	USD	Costo de cada panel solar
C_{CCPP}	412'800.000	USD	Costo de inversión en la CCPP
C_{WT}	3'795.000	USD	Costo de cada turbina de viento
C_{cd}	2.67	USD/gal	Costo del combustible
C_{in}^{PV}	121.88	USD	Costo del inversor de cada panel solar
C_{mt}^{CAES}	1041300	USD/Año	Costo de mantenimiento anual del CAES
C_{mt}^{CCPP}	4'000.000	USD/Año	Costo de mantenimiento anual del CCPP
C_{mt}^{PV}	8.13	USD /Año	Costo de mantenimiento de cada panel
C_{mt}^{WT}	121,050	USD/Año	Costo de mantenimiento de cada turbina de viento

Emisiones

Nombre	Valor	Unidad	Descripción
E_c^{PV}	1.392	tCO ₂ /kW	Emisiones debido a la construcción de cada panel
E_c^{WT}	0.675	tCO ₂ /kW	Emisiones debido a la construcción de cada turbina de viento
F_{PV}^{NOx}	0.1462	gNO _x /kWh	Factor de emisión de NO _x de los paneles solares
F_{PV}^{SOx}	0.2580	gSO _x /kWh	Factor de emisión de SO _x de los paneles solares
F_{WT}^{NOx}	0.0343	gNO _x /kWh	Factor de emisión de NO _x de las turbinas eólicas
F_{WT}^{SOx}	0.0430	gSO _x /kWh	Factor de emisión de SO _x de las turbinas eólicas
$E_{CCPP}^{CO_2}$	365*10 ⁻⁶	tCO ₂ /kW h	Emisiones debido a la operación de la CCPP
F_{CCPP}^{NOx}	0.027	gNO _x /kWh	Factor de emisiones de NO _x la CCPP
F_{CCPP}^{SOx}	0	gSO _x /kWh	Factor de emisiones de SO _x la CCPP

Nombre	Valor	Unidad	Descripción
N_{UTot}	1980000	Unidades	Número de usuarios totales del EH
P_{PV}^M	0.295	kW	Potencia pico de cada panel solar
P_{WT}^M	2500	kW	Potencia pico de cada turbina de viento
SOC_{max}	210000	kWh	Estado de carga máximo del CAES
SOC_{min}	0	kWh	Estado de carga mínimo del CAES
V_{min}^{inj}	0	kW/h	Minimum level of injected air into storage
V_{max}^{inj}	75000	kW/h	Maximum level of injected air into storage
V_{min}^{pump}	0	kW/h	Minimum level of pumped air from storage to combustion chamber
V_{max}^{pump}	75000	kW/h	Maximum level of pumped air from storage to combustion chamber
α^{inj}	0.7	-	Efficiency of injected power
α^{pump}	0.7	-	Efficiency of produced power
U_{CAES}	44	h/Año	Tiempo fuera de línea del CAES
U_{CCPP}	0.42	h/Año	Tiempo fuera de línea de la CCPP
U_{PV}	72	h/Año	Tiempo fuera de línea de los paneles solares
U_{WT}	60	h/Año	Tiempo fuera de línea de las turbinas de viento

CASOS

- **Caso 1:** Los expertos desean tener predominantemente soluciones con un mínimo costo ($KPI8, KPI9$), dejando en un segundo plano el factor ambiental. Se asumen que la carga y las curvas de generación de sol y viento son iguales en ambos días.
- **Caso 2:** Se le da una mayor importancia al factor ambiental ($KPI1, KPI2, KPI3$ y $KPI10$). La carga y las curvas de generación de sol y viento son iguales a la del caso de estudio 1.
- **Caso 3.** Se le da una mayor importancia al factor ambiental ($KPI1, KPI2, KPI3$ y $KPI10$). En el primer día de operación se supone una potencia solar y eólica igual a los dos casos anteriores. En el segundo día de operación se supone un día con poco sol y viento.

KPIs considerados en el estudio

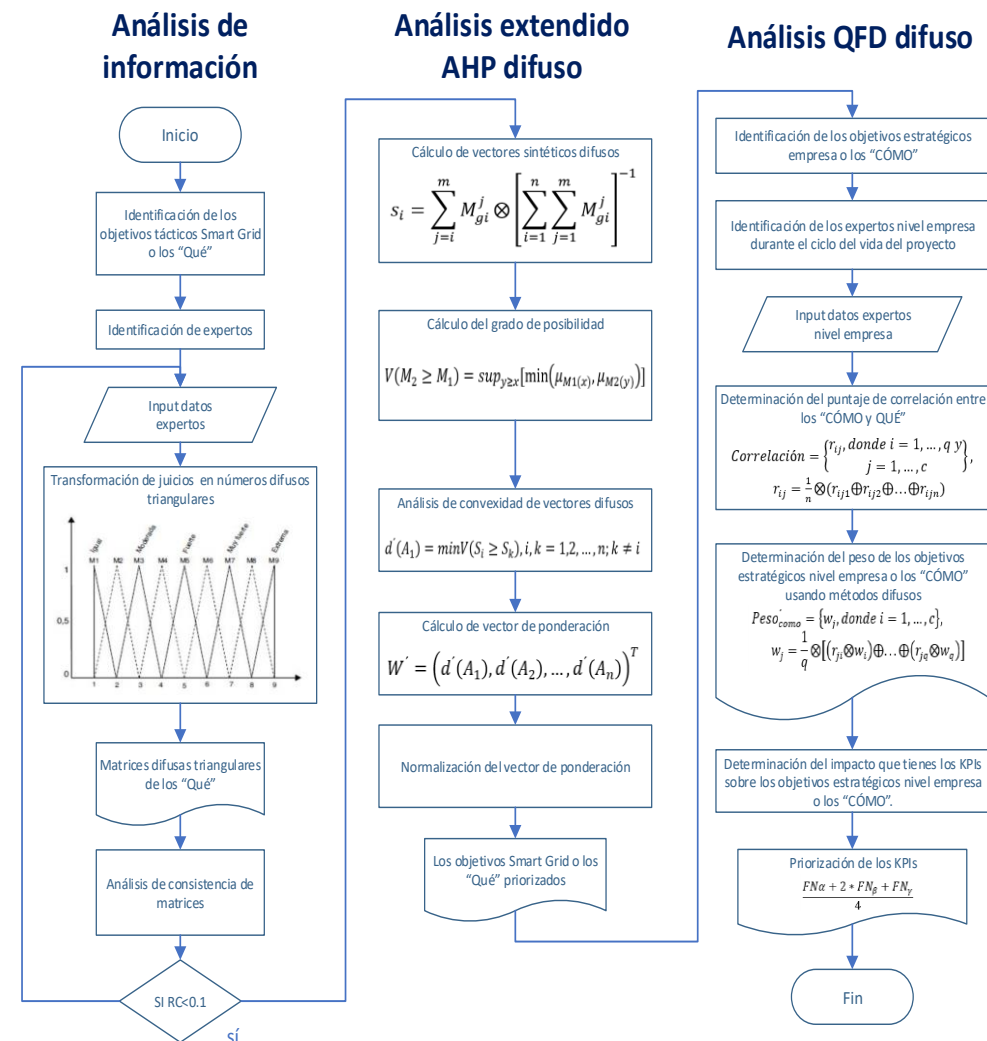
Incrementar la capacidad de la generación distribuida	KPI1 Planeación
Reducir la energía no suplida por fuentes renovables	KPI2 Operación
Incrementar el número de horas suministradas por fuentes renovables	KPI3 Operación
Disminuir el SAIDI	KPI4 Operación
Disminuir el SAIFI	KPI5 Operación
Disminuir el ENS	KPI6 Operación
Reducir las pérdidas técnicas	KPI7 Operación
Minimizar los costos de operación y de inversión	KPI8 Planeación
Minimizar LCOE	KPI9 Planeación
Reducir las emisiones de CO₂	KPI10 Operación
Reducir las emisiones de SOx	KPI11 Operación
Reducir las emisiones de NOx	KPI12 Operación

CASOS

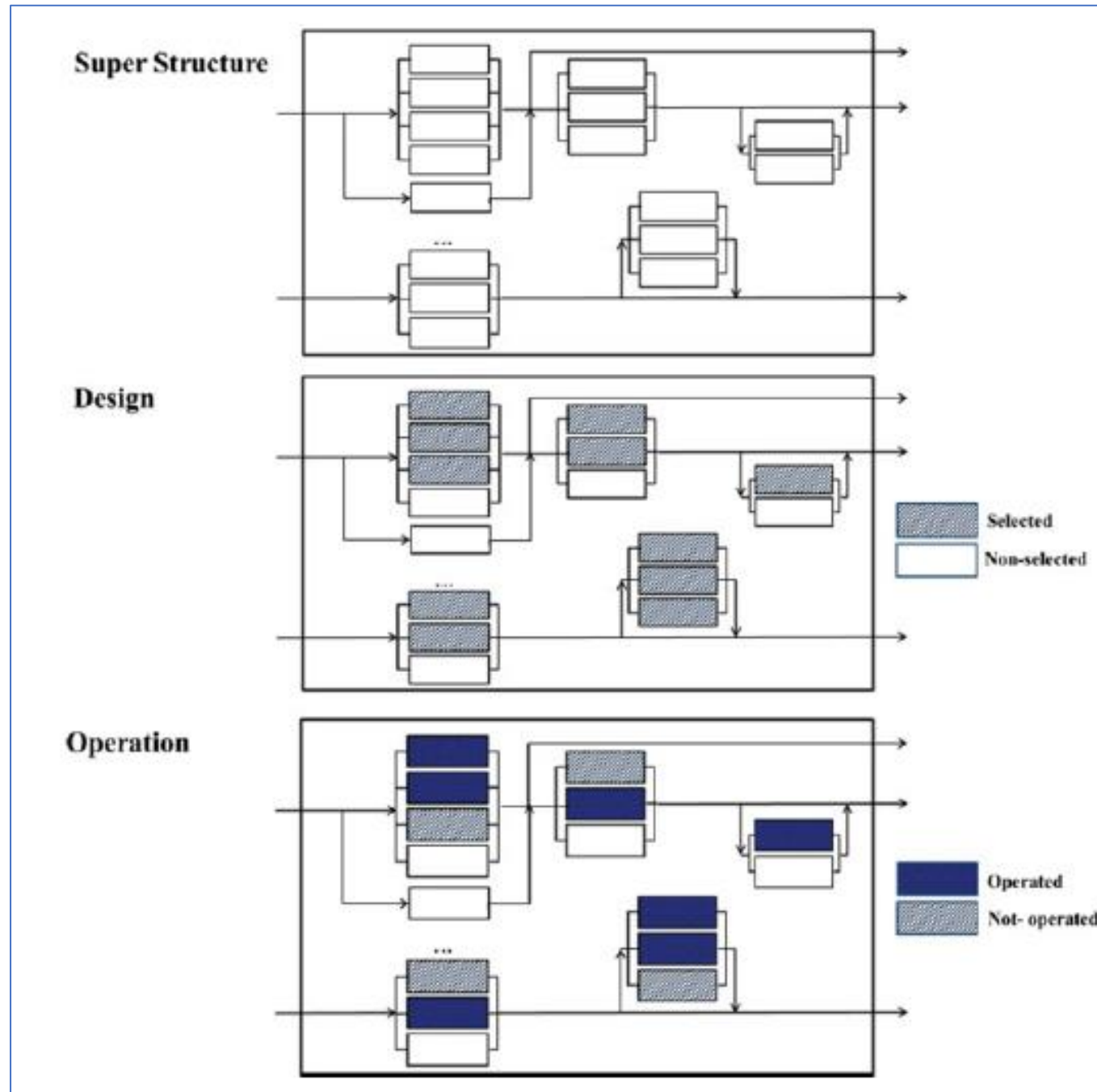
Valoración		Numero Triangular Difuso		
Muy Baja	MB	1	1	1
Baja	B	2	3	4
Media	M	4	5	6
Alta	A	6	7	8
Muy Alta	MA	8	9	10

	KPI1	KPI2	KPI3	KPI4	KPI5	KPI6	KPI7	KPI8	KPI9	KPI10	KPI11	KPI2
Acceso Universal	Q2 ₁₁	Q2 ₁₂	Q2 ₁₃	Q2 ₁₄	Q2 ₁₅	Q2 ₁₆	Q2 ₁₇	Q2 ₁₈	Q2 ₁₉	Q2 ₁₁₀	Q2 ₁₁₁	Q2 ₁₁₂
Caso 1	A	A	A	A	A	A	M	M	M	M	M	M
Caso 2 y 3	A	A	MA	MB	MB	MB	MB	MB	MB	A	B	M
Competitividad	Q2 ₂₁	Q2 ₂₂	Q2 ₂₃	Q2 ₂₄	Q2 ₂₅	Q2 ₂₆	Q2 ₂₇	Q2 ₂₈	Q2 ₂₉	Q2 ₂₁₀	Q2 ₂₁₁	Q2 ₂₁₂
Caso 1	A	A	A	MA	MA	MA	A	A	M	M	M	M
Caso 2 y 3	M	A	MA	MB	MB	MB	MB	MB	MB	A	B	MB
Seguridad y Calidad	Q2 ₃₁	Q2 ₃₂	Q2 ₃₃	Q2 ₃₄	Q2 ₃₅	Q2 ₃₆	Q2 ₃₇	Q2 ₃₈	Q2 ₃₉	Q2 ₃₁₀	Q2 ₃₁₁	Q2 ₃₁₂
Caso 1	B	B	B	A	A	A	MA	MA	MA	MB	MB	MB
Caso 2 y 3	MA	B	A	MB	MB	MB	MB	B	B	M	M	M
Sostenibilidad	Q2 ₄₁	Q2 ₄₂	Q2 ₄₃	Q2 ₄₄	Q2 ₄₅	Q2 ₄₆	Q2 ₄₇	Q2 ₄₈	Q2 ₄₉	Q2 ₄₁₀	Q2 ₄₁₁	Q2 ₄₁₂
Caso 1	MB	MB	A	M	B	B	M	M	M	MA	MA	MA
Caso 2 y 3	MB	MA	A	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MA	MA	MA

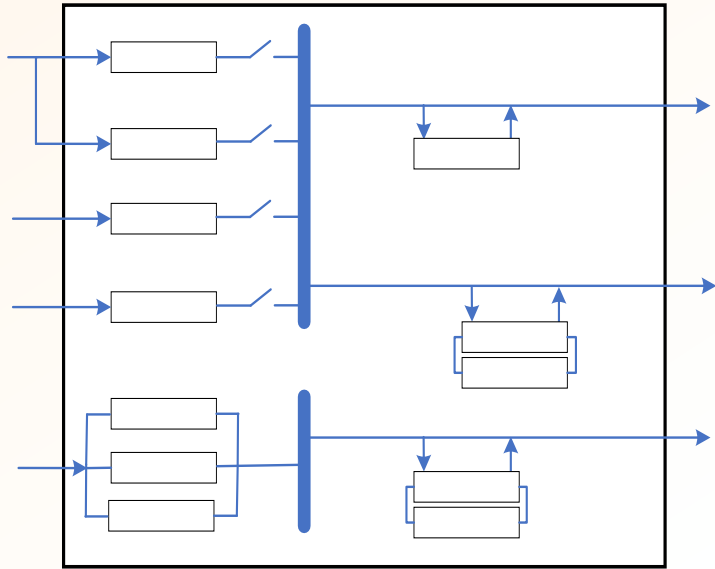
Valoraciones de relación existente entre los KPIs y objetivos Smart Energy.



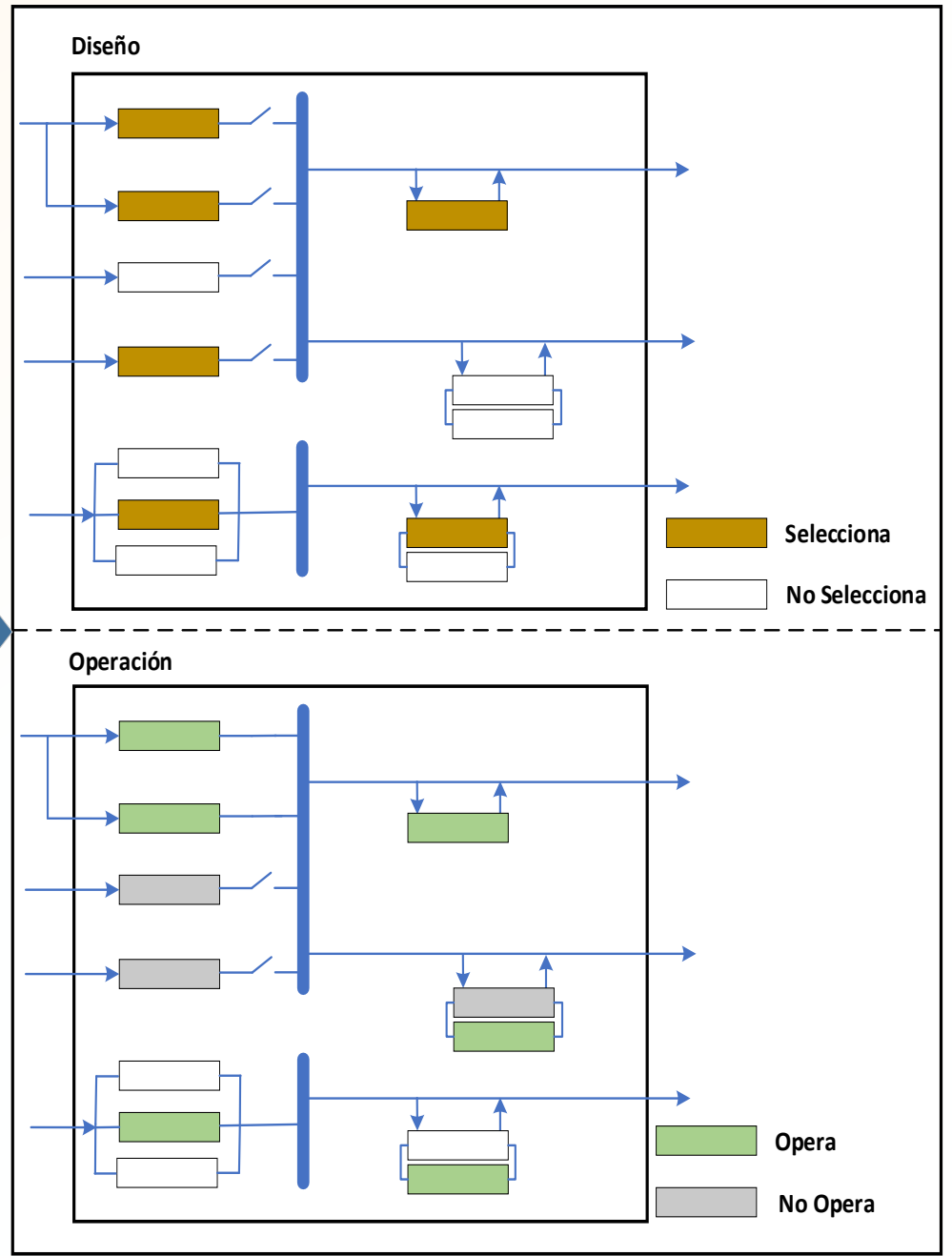
Solución del problema de Planeación-Diseño y Operación



Solución del problema de Planeación-Diseño y Operación



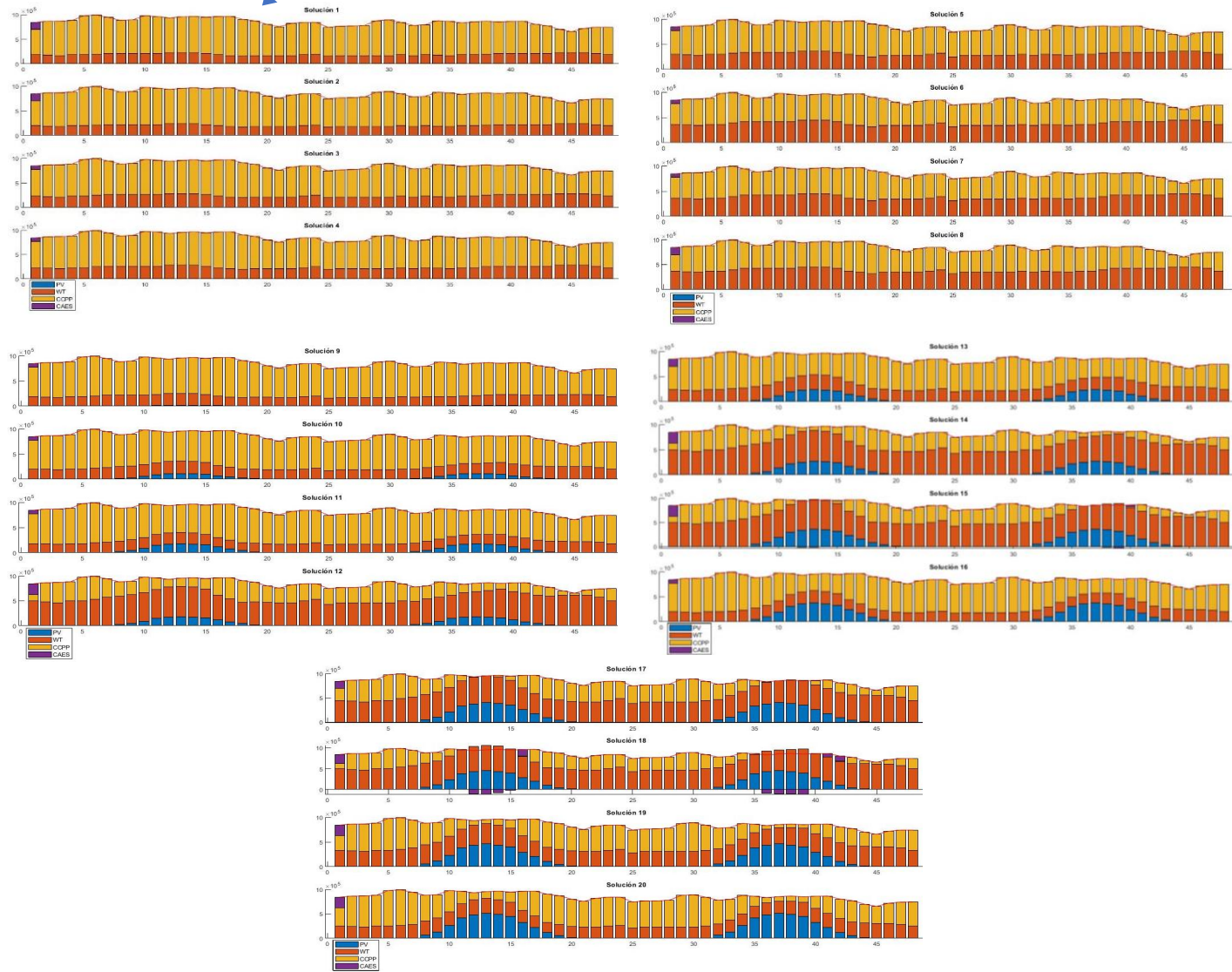
OPTIMIZACIÓN.
Bi-nivel
Multiobjetivo



CASO 1

en las 11 primeras soluciones y las soluciones 13, 16, 19 y 20, entre el 60 y 80 % de la energía es generada con plantas de ciclo combinado

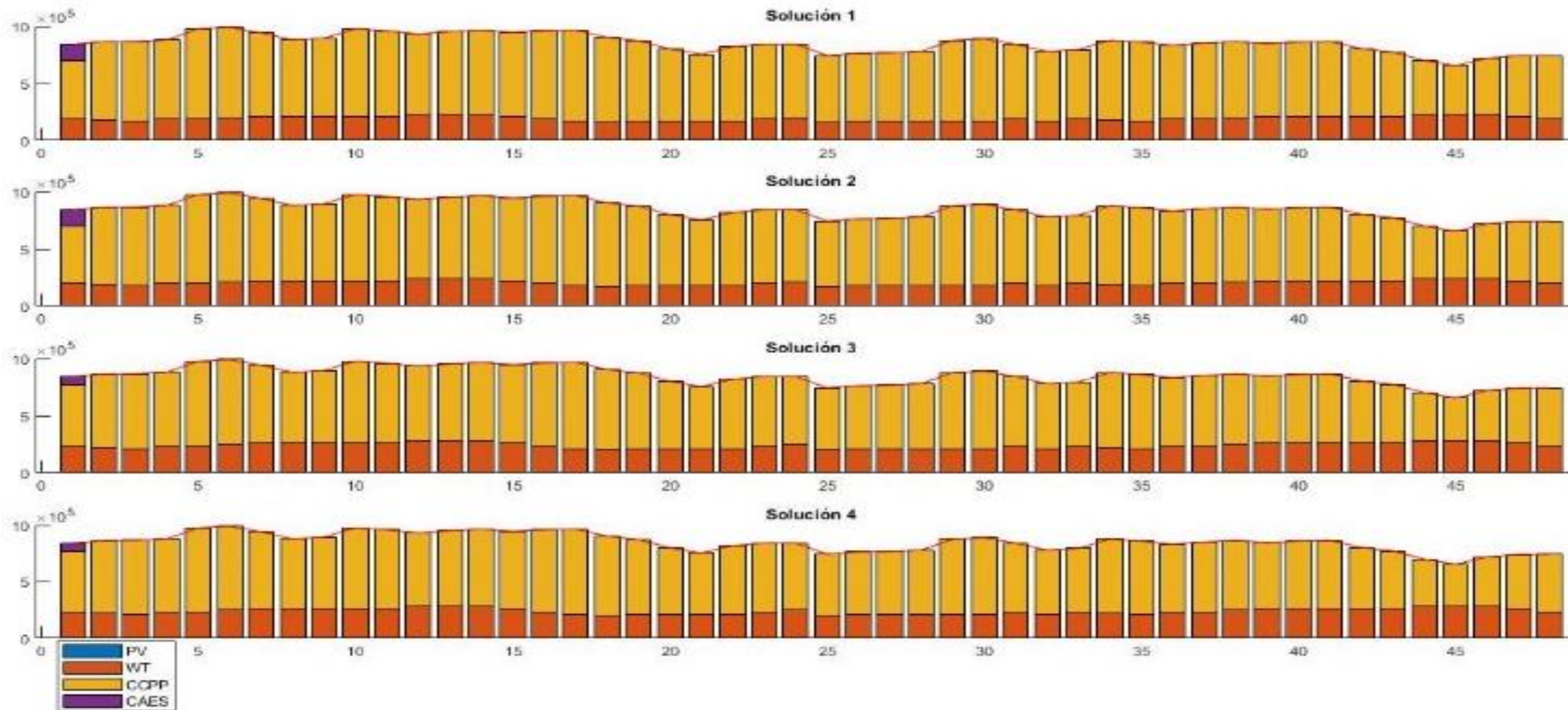
Solución #	Número de Paneles Solares	Número de Turbinas Eólica	Número de generadores de ciclo combinado	Número de AA- CAES
1	0	596	2	2
2	0	622	2	2
3	0	735	2	1
4	0	744	2	1
5	0	957	2	1
6	0	1,168	2	1
7	0	1,177	2	1
8	0	1,188	2	2
9	57,582	600	2	1
10	363,350	653	2	1
11	590,260	586	2	1
12	597,232	1,600	2	3
13	791,643	766	2	2
14	884,706	1,600	2	3
15	1,180,712	1,600	2	3
16	1,230,917	641	2	1
17	1,308,190	1,441	2	2
18	1,490,351	1,600	2	3
19	1,513,914	1,064	2	3
20	1,676,484	799	2	3



Soluciones óptimas dadas en la fase de planeación /diseño Caso 1.

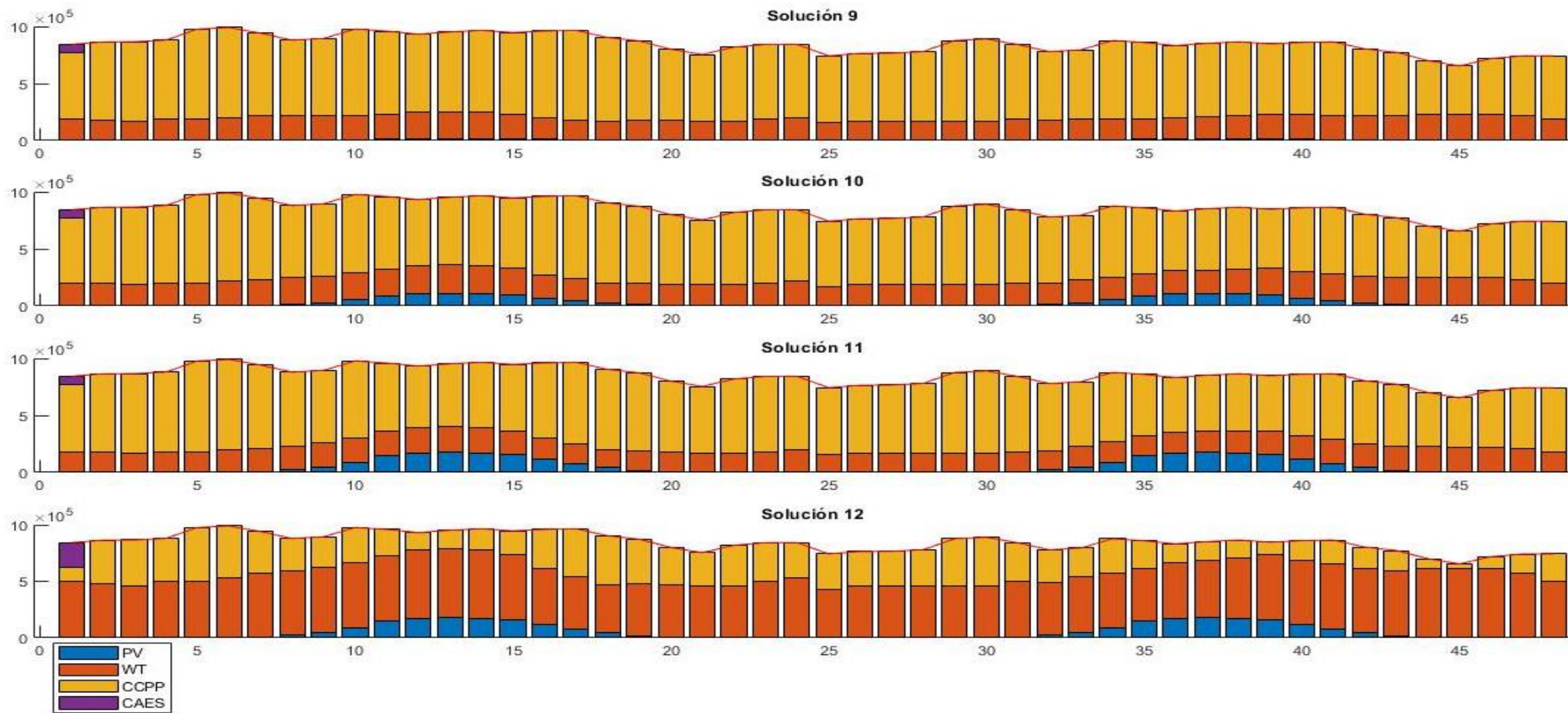
Soluciones de operación del EH caso 1.

CASO 1



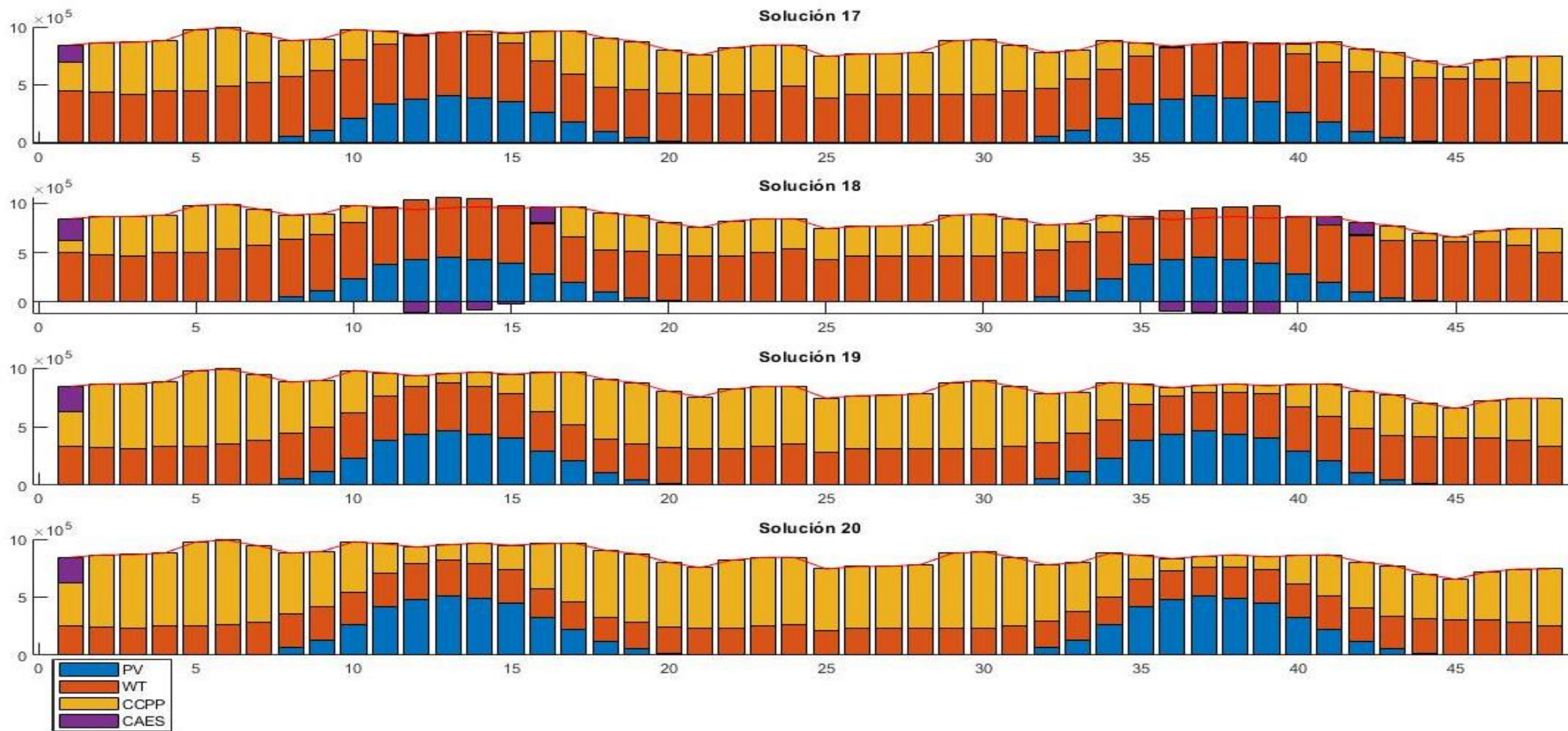
Soluciones de operación del EH caso 1.

CASO 1



Soluciones de operación del EH caso 1.

CASO 1



Soluciones de operación del EH caso 1.

CASO 1

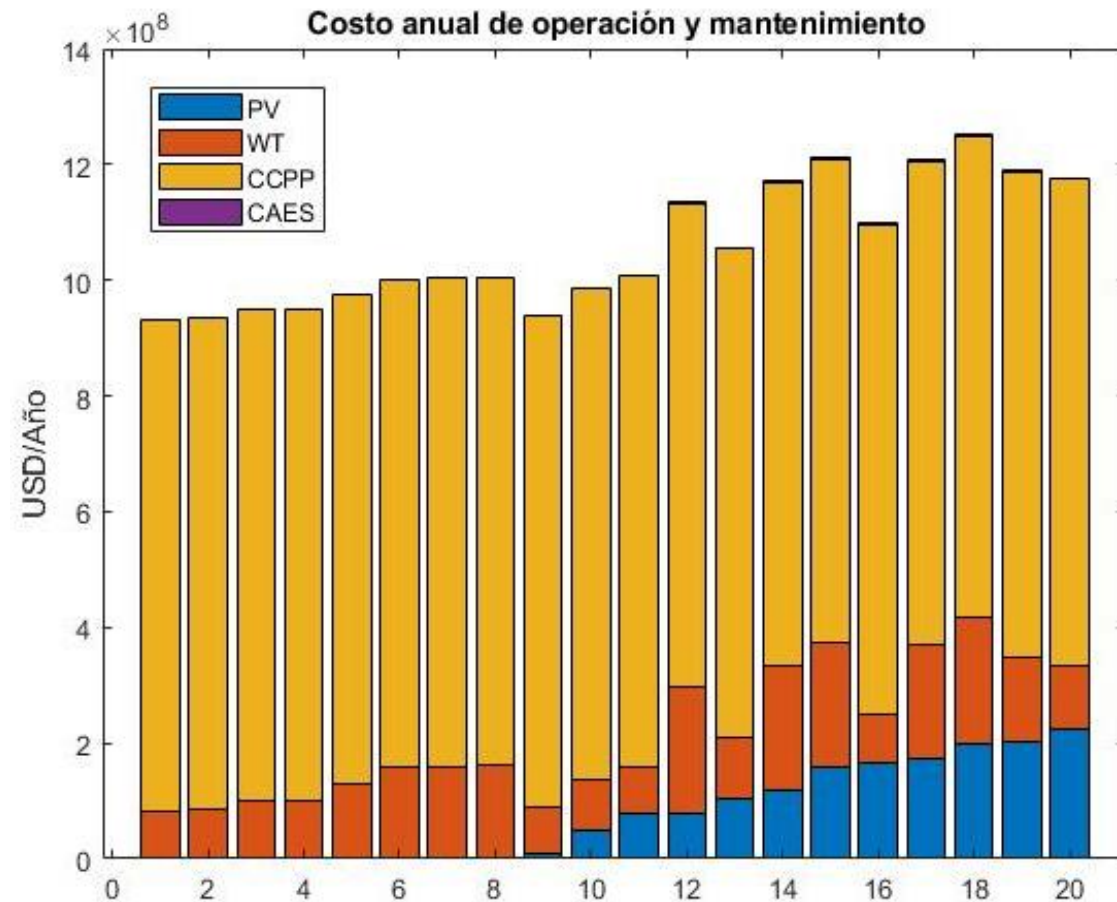
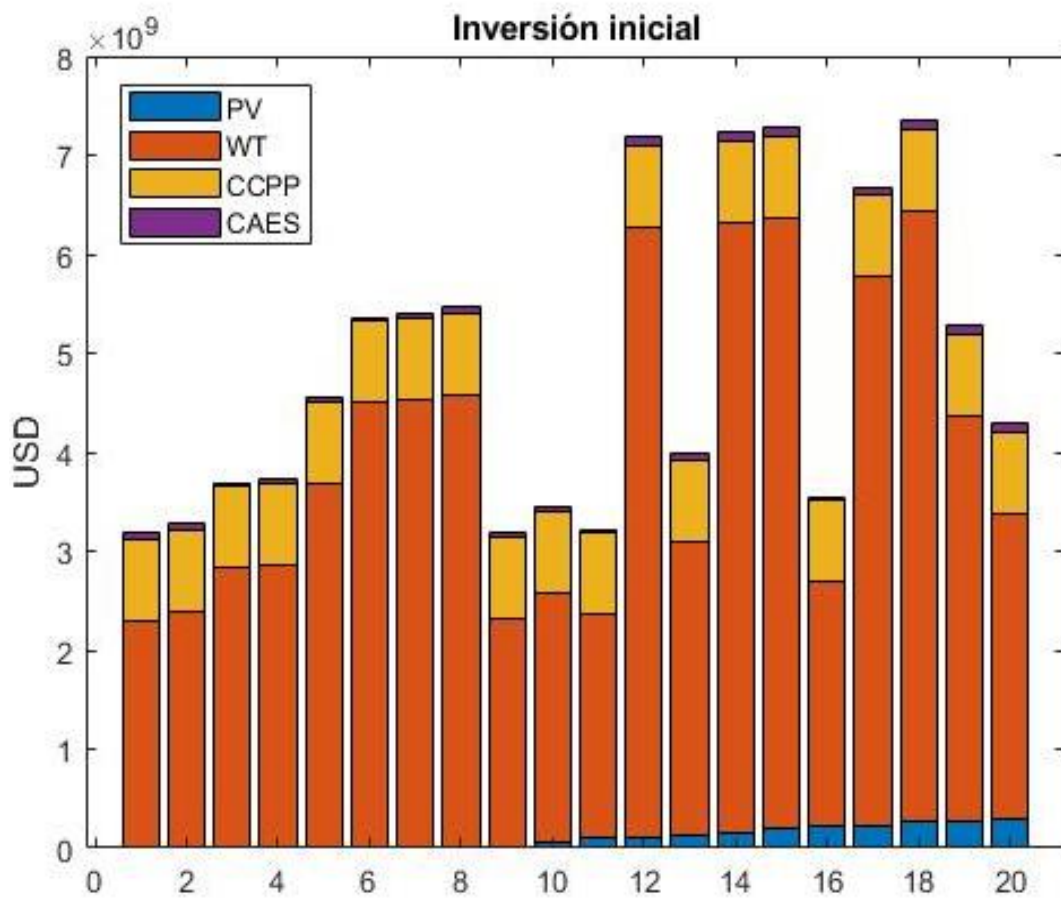
KIPs	KPI1	KPI2	KPI3	KPI4	KPI5	KPI6	KPI7	KPI8	KPI9	KPI10	KPI11	KPI12						
Unidades	[%]	[%]	[%]	Horas/Año	Eventos/ Año	kWh/Año	kWh/30 Años	\$ en 30 Años	\$/kWh	tCO2/30 años	kgSOx/30 años	kgNOx/30 años						
KPIs optimizados	4.6	77	100	0.1	0.00011	0.1	1	9,902,065,567	0.18	3,623,130	2,099,068	1,937,195						
	4.9	76		0.1				10,017,104,430	0.18	3,633,228	2,077,136	1,916,309						
	6.0	72		0.1				10,482,400,897	0.19	3,683,241	1,986,515	1,829,897						
	6.1	72		0.1				10,522,222,042	0.19	3,686,736	1,978,923	1,822,667						
	8.6	63		0.1				11,464,655,810	0.21	3,769,463	1,799,251	1,651,561						
	11.6	55		0.1				12,398,240,434	0.22	3,851,414	1,621,266	1,482,063						
	11.7	55		0.1				12,438,061,579	0.22	3,854,909	1,613,674	1,474,833						
	1.9	54		0.1				12,521,412,001	0.22	3,853,058	1,599,698	1,461,634						
	4.7	76		0.1				9,906,752,004	0.18	3,634,246	2,099,174	1,932,044						
	5.7	71		0.1				10,256,315,744	0.18	3,673,086	2,047,999	1,856,012						
	5.4	71		0.1				10,045,256,374	0.18	3,660,612	2,099,716	1,885,007						
	24.2	32		0.1				14,603,755,908	0.26	4,042,608	1,234,832	1,060,961						
	7.9	62		0.1				10,952,140,453	0.20	3,736,421	1,938,923	1,714,014						
	26.4	29		0.1				14,711,933,260	0.26	4,059,772	1,228,751	1,029,507						
												14,823,618,158	0.27					
		28.9		26				1.1						4,081,669	1,225,731	1,000,129		
		7.2		63				0.1						10,529,689,019	0.19	3,720,224	2,039,770	1,770,727
		23.9		31				0.1						14,133,157,583	0.25	4,030,180	1,359,192	1,115,798
	31.3	24	1.1						14,942,045,865	0.27	4,127,322	1,240,021	985,601					
	15.1	43	0.1						12,577,135,750	0.22	3,889,161	1,667,575	1,391,238					
	10.7	52	0.1						11,465,799,846	0.21	3,795,944	1,887,672	1,586,328					
KPIs Línea Base	1.36	93	100	0.3	0.53	1,802,738	1	11,525,592,330	0.20	145,592,814	1,734,958,264	440,564,630.8						

KPIs optimizados en el modelo Caso 1.

CASO 1



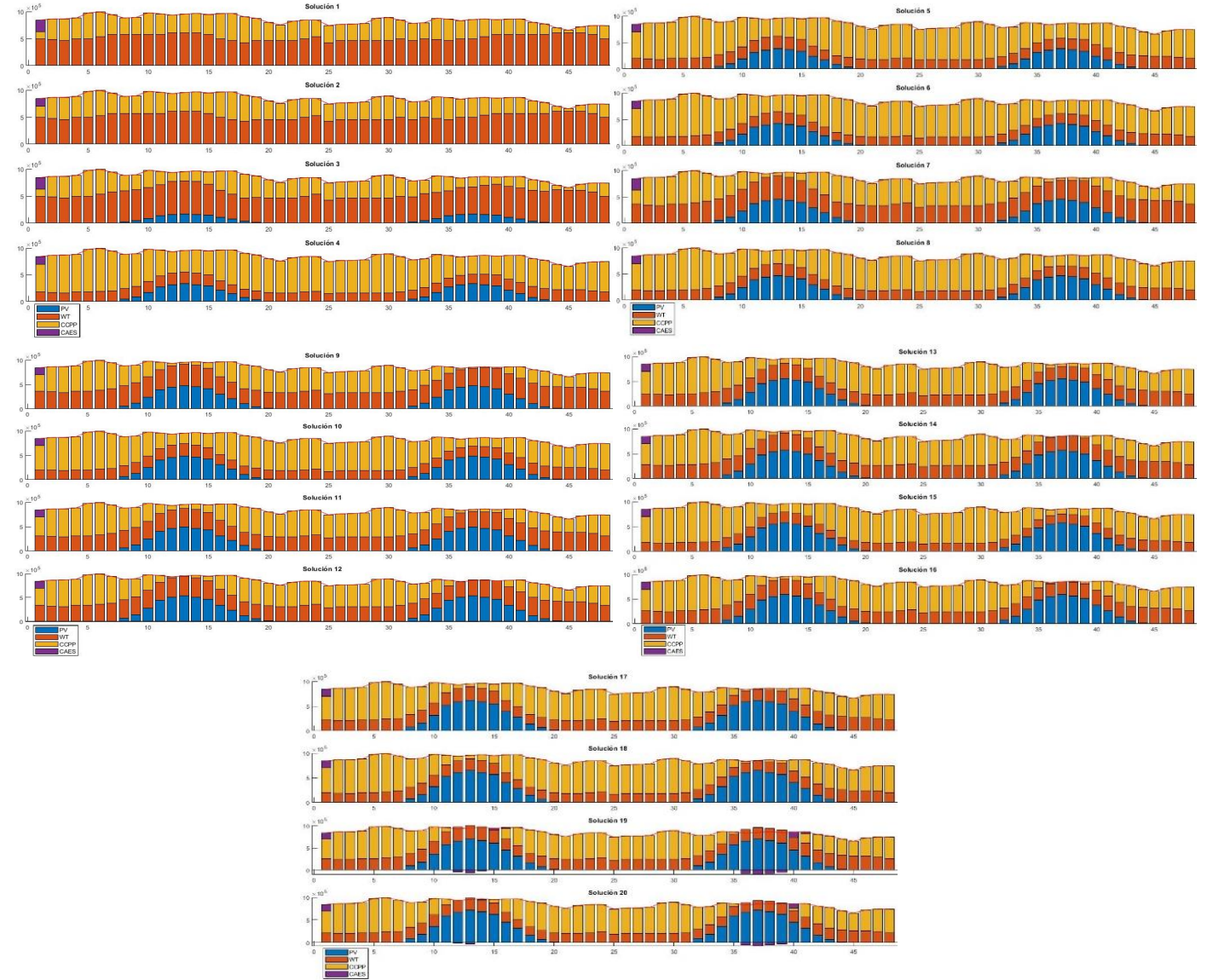
Diferencia porcentual entre el KPI8 del modelo y la línea base para el caso 1.



CASO 2

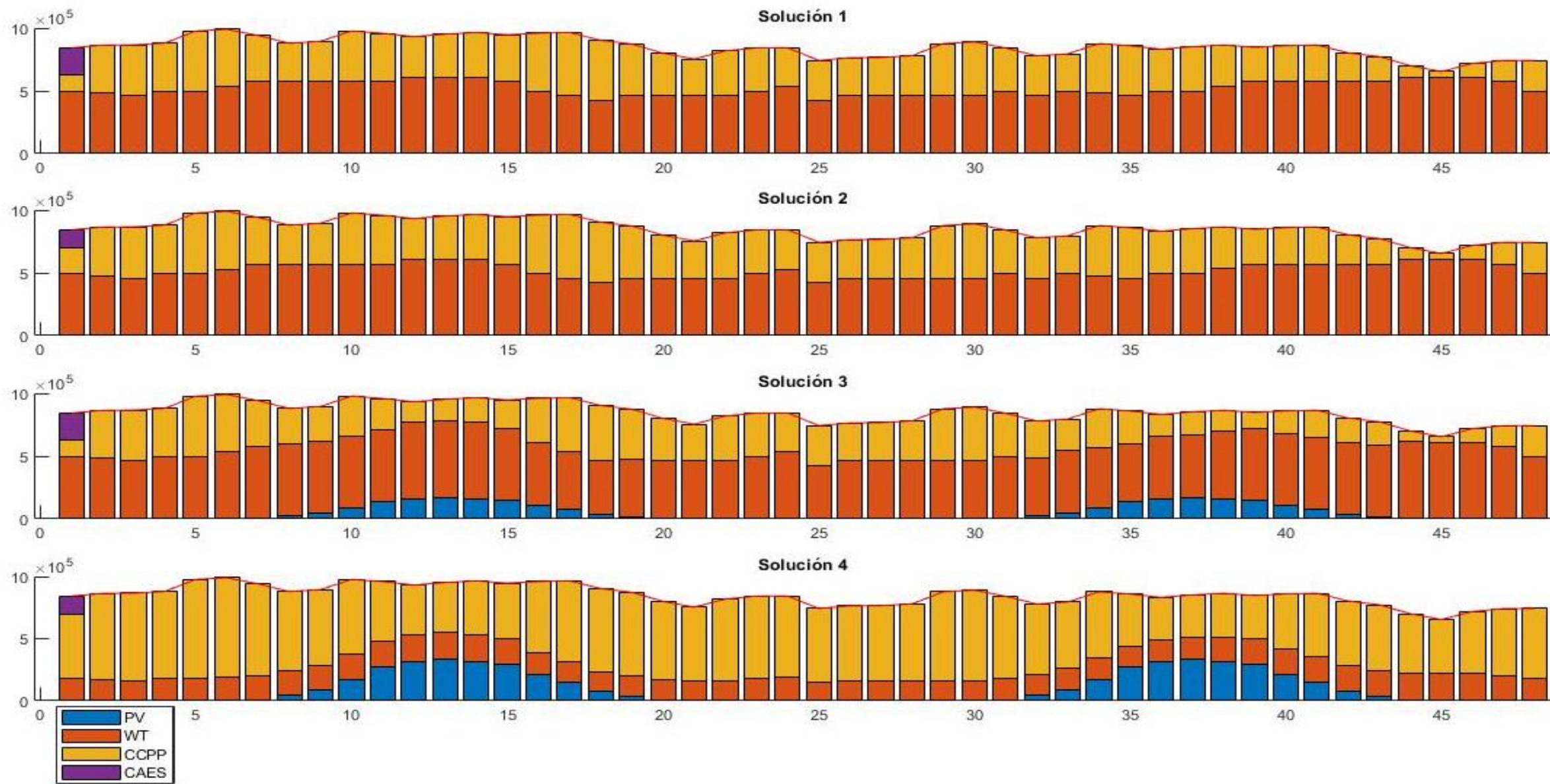
Solució n #	Número de Paneles Solares	Número de Turbinas Eólicas	Número de generadores de ciclo combinado	Número de AA-CAES
1	0	1,600	2	3
2	2,512	1,584	2	2
3	557,524	1,600	2	3
4	1,098,241	568	2	2
5	1,245,321	626	2	2
6	1,391,305	575	2	2
7	1,481,423	1,147	2	3
8	1,537,014	608	2	2
9	1,556,725	1,156	2	2
10	1,603,939	650	2	2
11	1,616,495	1,005	2	2
12	1,747,389	1,067	2	2
13	1,810,766	803	2	2
14	1,869,996	887	2	2
15	1,892,125	569	2	2
16	1,928,760	835	2	2
17	2,038,509	709	2	2
18	2,112,398	629	2	2
19	2,298,448	822	2	2
20	2,347,069	692	2	2

Soluciones óptimas dadas en la fase de planeación /diseño Caso 2.



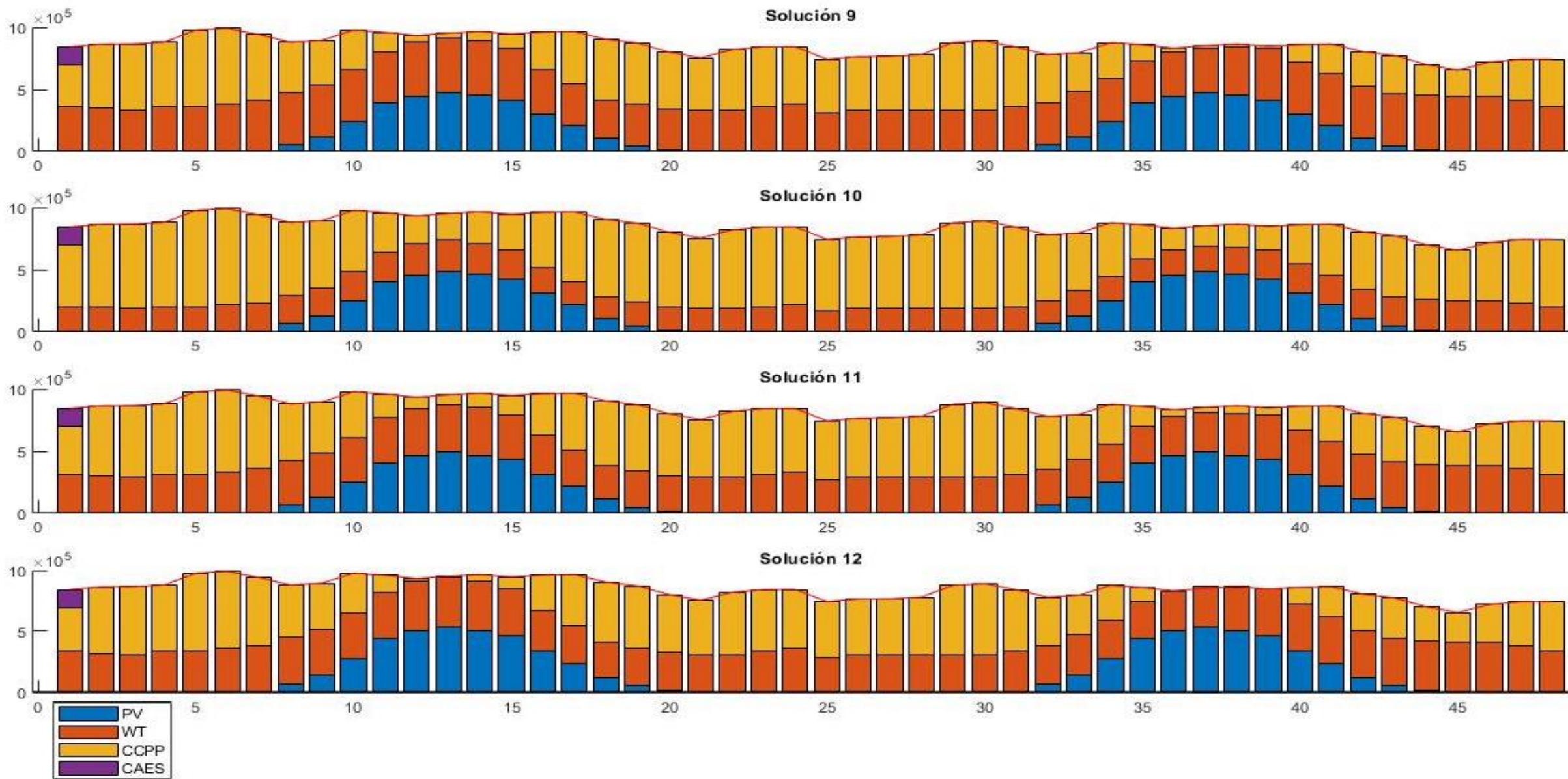
Soluciones de operación del EH caso 2.

CASO 2



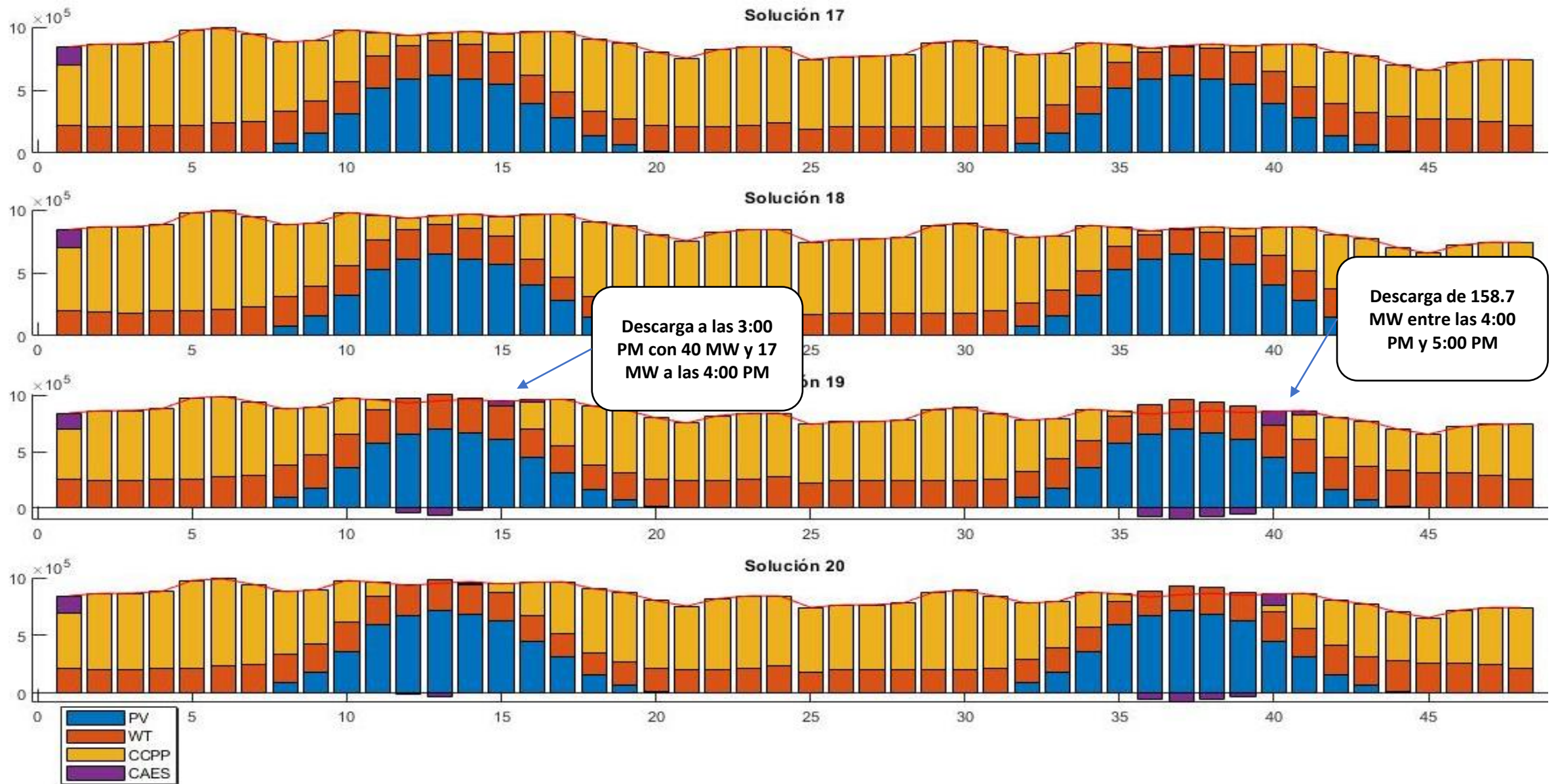
Soluciones de operación del EH caso 2.

CASO 2



Soluciones de operación del EH caso 2.

CASO 2



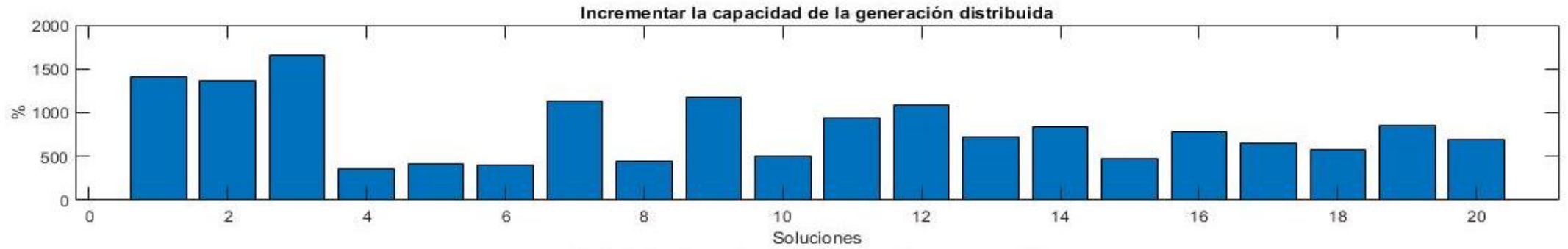
Soluciones de operación del EH caso 2.

CASO 2

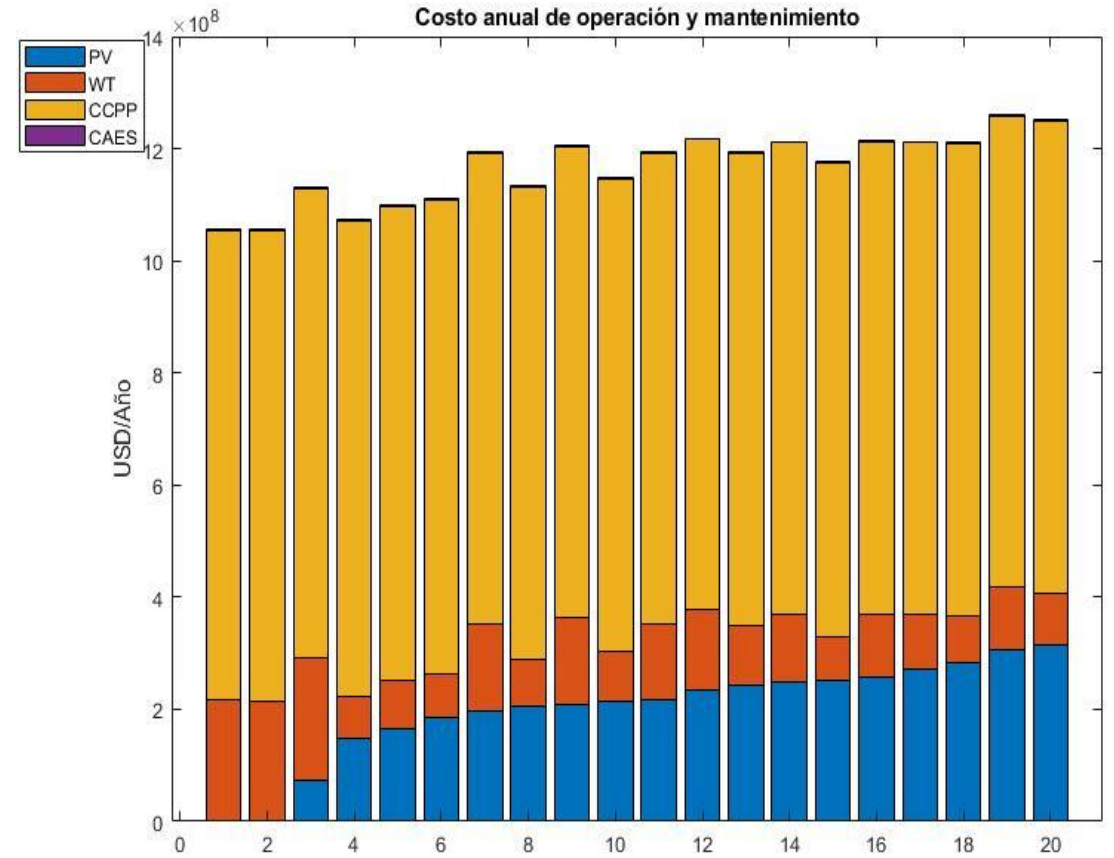
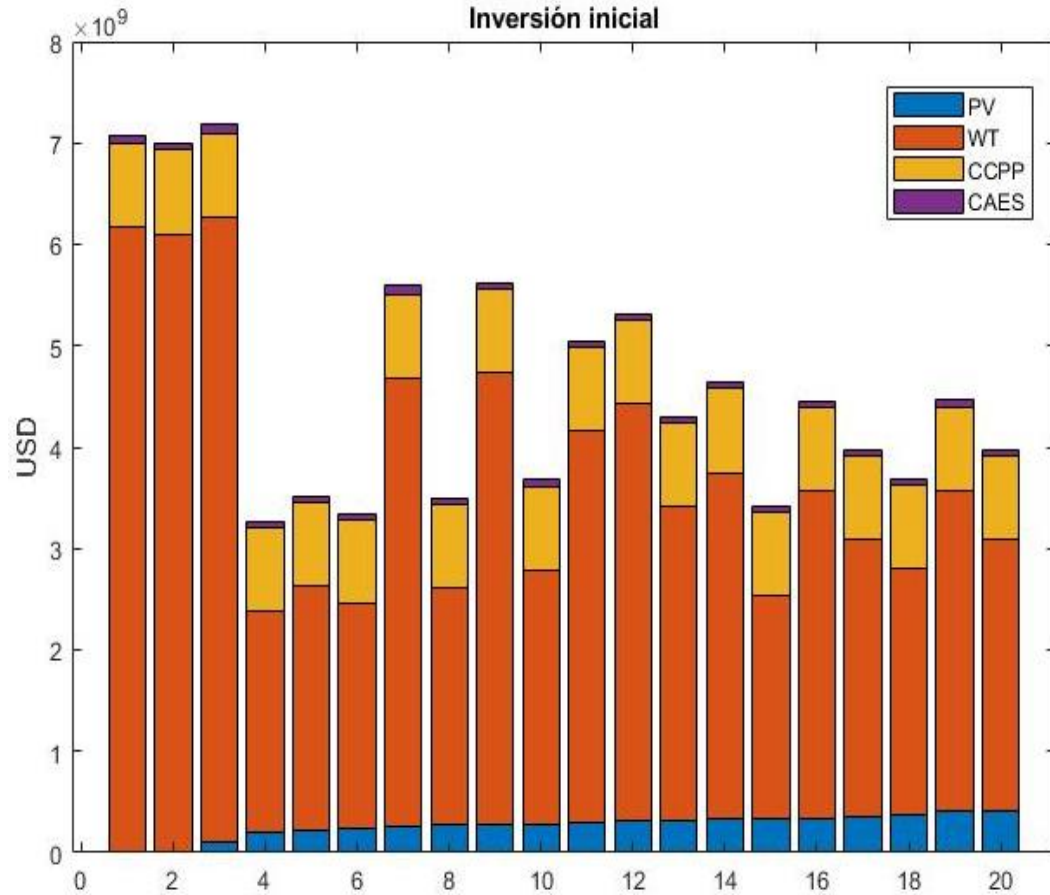
KIPs	KPI1	KPI2	KPI3	KPI4	KPI5	KPI6	KPI7	KPI8	KPI9	KPI10	KPI11	KPI12
Unidades	[%]	[%]	[%]	Horas/Año	Eventos/Año	kWh/Año	kWh/30 Años	\$ en 30 Años	\$/kWh	tCO2/30 años	kgSOx/30 años	kgNOx/30 años
KPIs optimizados	20.4	38	100	0.1	0.00011	0.1	1	14,379,015,667	0.26	4,006,951	1,247,465	1,126,307
	19.9	39		0.1				14,274,487,660	0.26	4,007,011	1,265,606	1,143,248
	23.9	33		0.1				14,588,813,666	0.26	4,040,238	1,235,672	1,065,306
	6.1	67		0.1				10,191,449,033	0.18	3,677,825	2,099,456	1,839,524
	7.1	63		0.1				10,503,420,847	0.19	3,709,134	2,047,421	1,776,839
	6.8	63		0.1				10,332,701,921	0.18	3,698,042	2,087,353	1,801,835
	16.8	41		0.1				12,932,148,736	0.23	3,919,458	1,598,249	1,328,118
	7.5	61		0.1				10,533,543,532	0.19	3,719,558	2,056,434	1,759,383
	17.3	40		0.1				12,965,626,123	0.23	3,933,573	1,593,762	1,317,011
	8.2	58		0.1				10,744,559,626	0.19	3,739,866	2,019,590	1,718,321
	14.2	45		0.1				12,320,007,434	0.22	3,878,495	1,719,871	1,431,772
	16.1	41		0.1				12,643,632,635	0.23	3,911,044	1,665,305	1,368,110
	11.1	50		0.1				11,499,348,731	0.21	3,811,639	1,886,155	1,572,784
	12.8	47		0.1				11,893,301,183	0.21	3,847,800	1,814,046	1,498,826
	7.8	59		1.1				10,494,614,600	0.19	3,725,613	2,081,821	1,751,858
	12.1	48		0.1				11,685,336,530	0.21	3,831,112	1,856,666	1,534,168
	10.2	52		0.1				11,169,139,386	0.20	3,788,727	1,960,630	1,623,377
	9.2	54		1.1				10,842,978,310	0.19	3,762,068	2,026,549	1,679,558
	13.0	45		0.1				11,768,245,841	0.21	3,866,828	1,874,152	1,517,478
	10.8	49		0.1				11,210,749,885	0.20	3,810,735	1,976,258	1,610,530
KPIs Línea Base	1.36	93	100	0.3	0,53	1802738	1	11,525,592,330	0.20	145,592,814	1,734,958,264	440,564,630

KPIs optimizados en el modelo Caso 2.

CASO 2



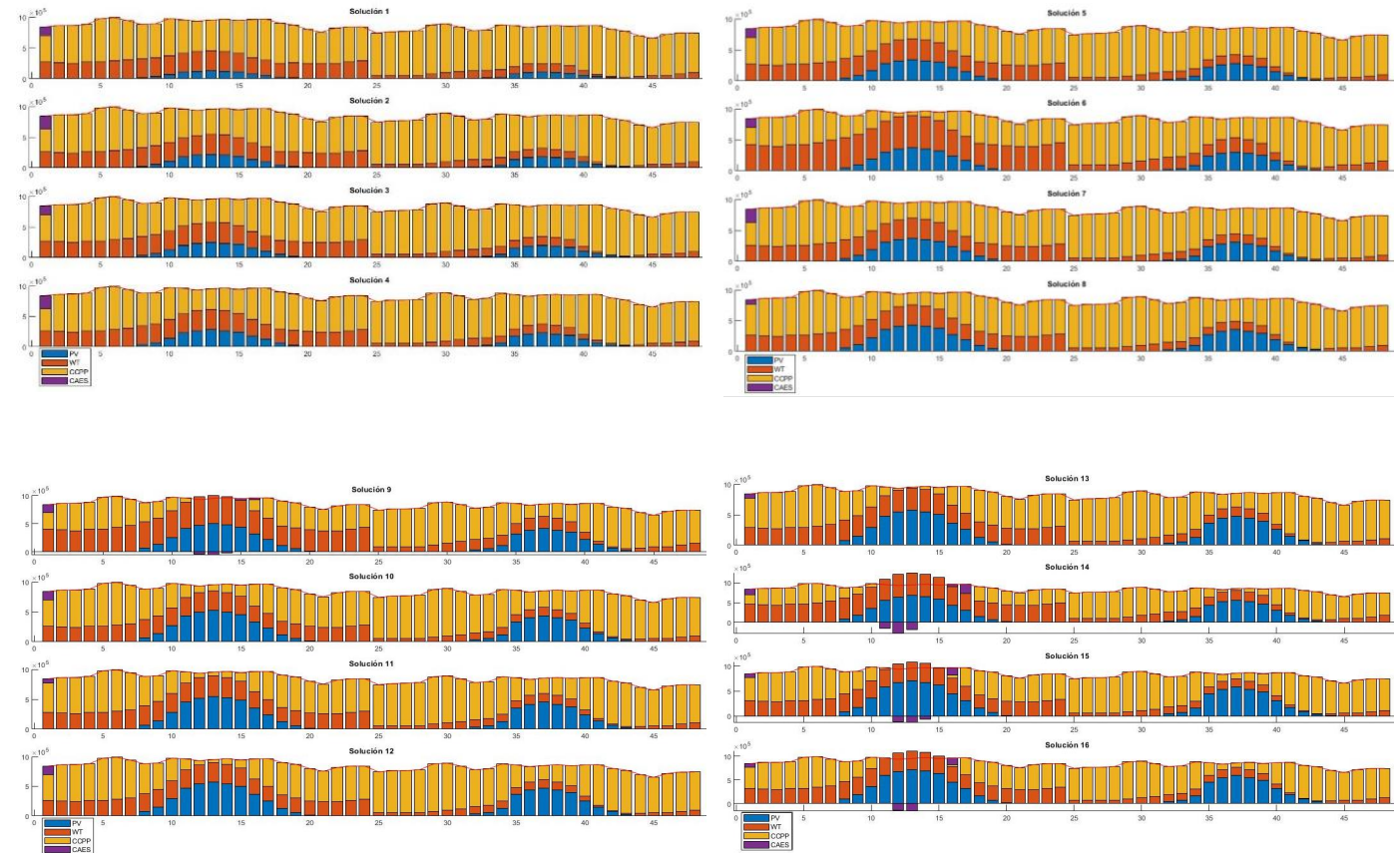
Diferencia porcentual entre el KPI1 del modelo y la Línea Base, para el caso 2.



CASO 3

Solución #	Número de Paneles Solares	Número de Turbinas Eólicas	Número de generadores de ciclo combinado	Número de AA-CAES
1	410,247	916	2	2
2	715,597	904	2	3
3	806,641	919	2	2
4	922,907	915	2	3
5	1,120,319	938	2	2
6	1,218,766	1,457	2	2
7	1,221,467	897	2	3
8	1,408,529	908	2	1
9	1,658,098	1,405	2	2
10	1,721,997	906	2	2
11	1,801,552	954	2	1
12	1,879,551	904	2	2
13	1,892,838	1,003	2	1
14	2,241,523	1,599	2	2
15	2,315,210	1,045	2	1
16	2,352,912	1,100	2	1

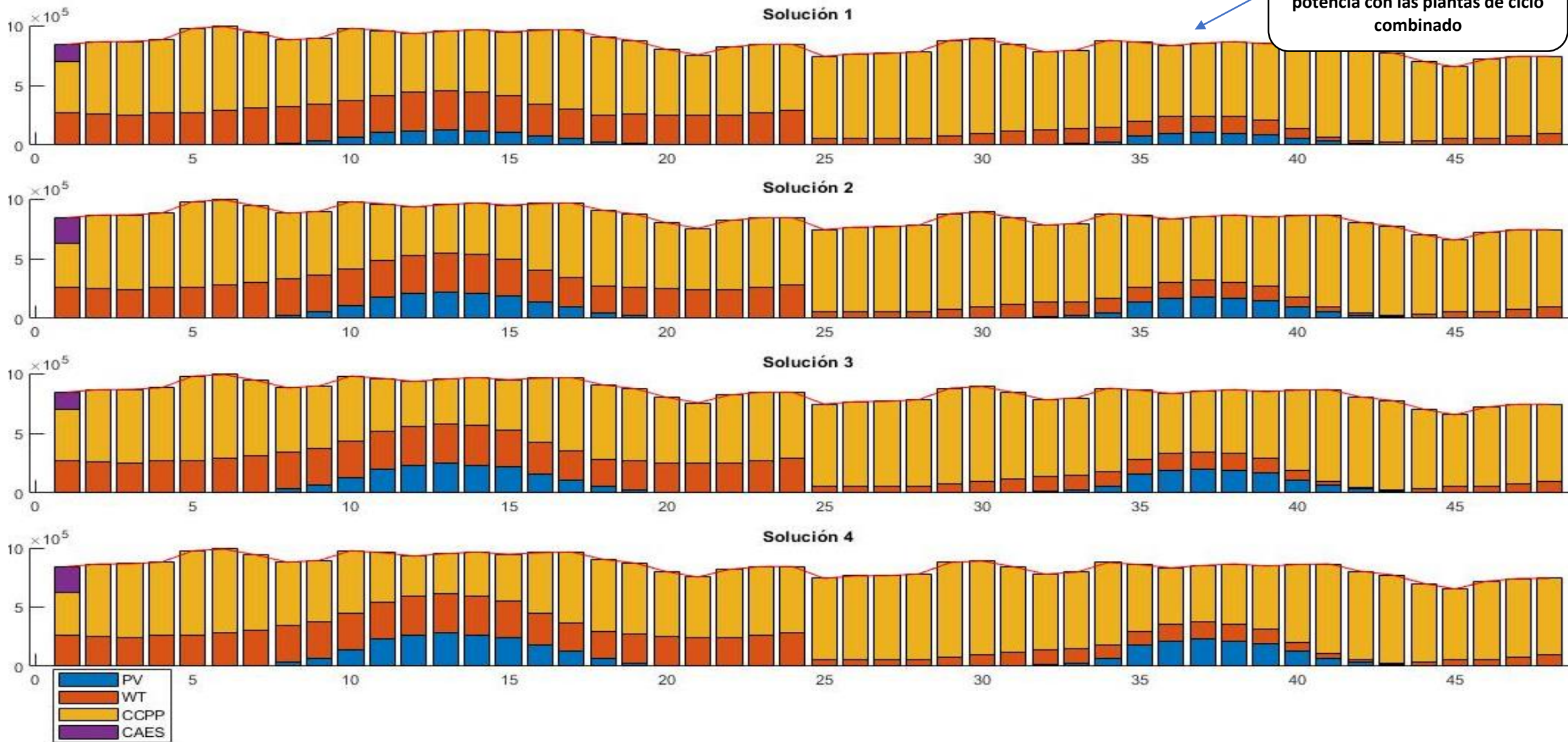
Soluciones óptimas dadas en la fase de planeación /diseño Caso 3.



Soluciones de operación del EH caso 3.

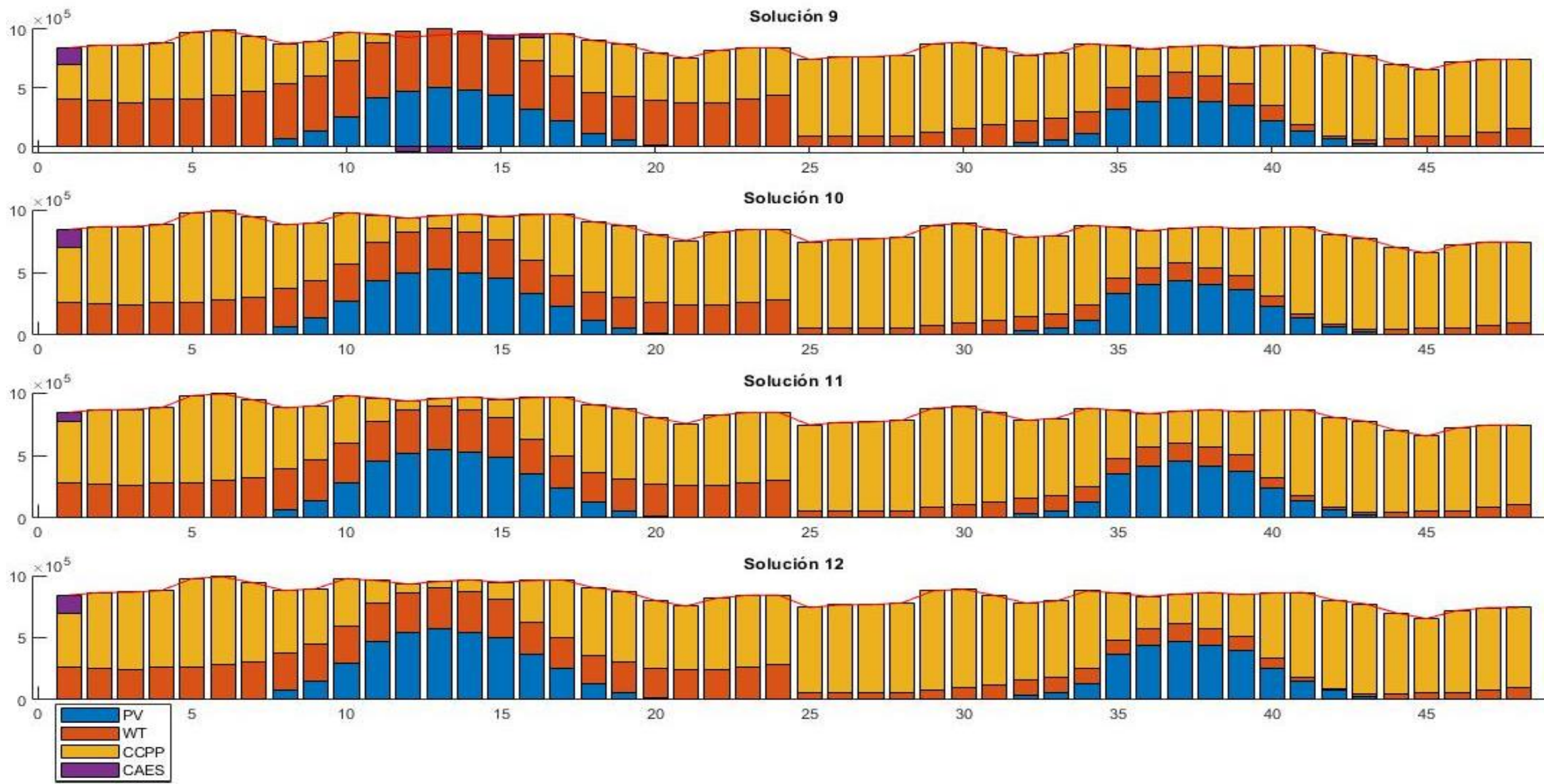
CASO 3

El algoritmo compensa este déficit con la generación de potencia con las plantas de ciclo combinado



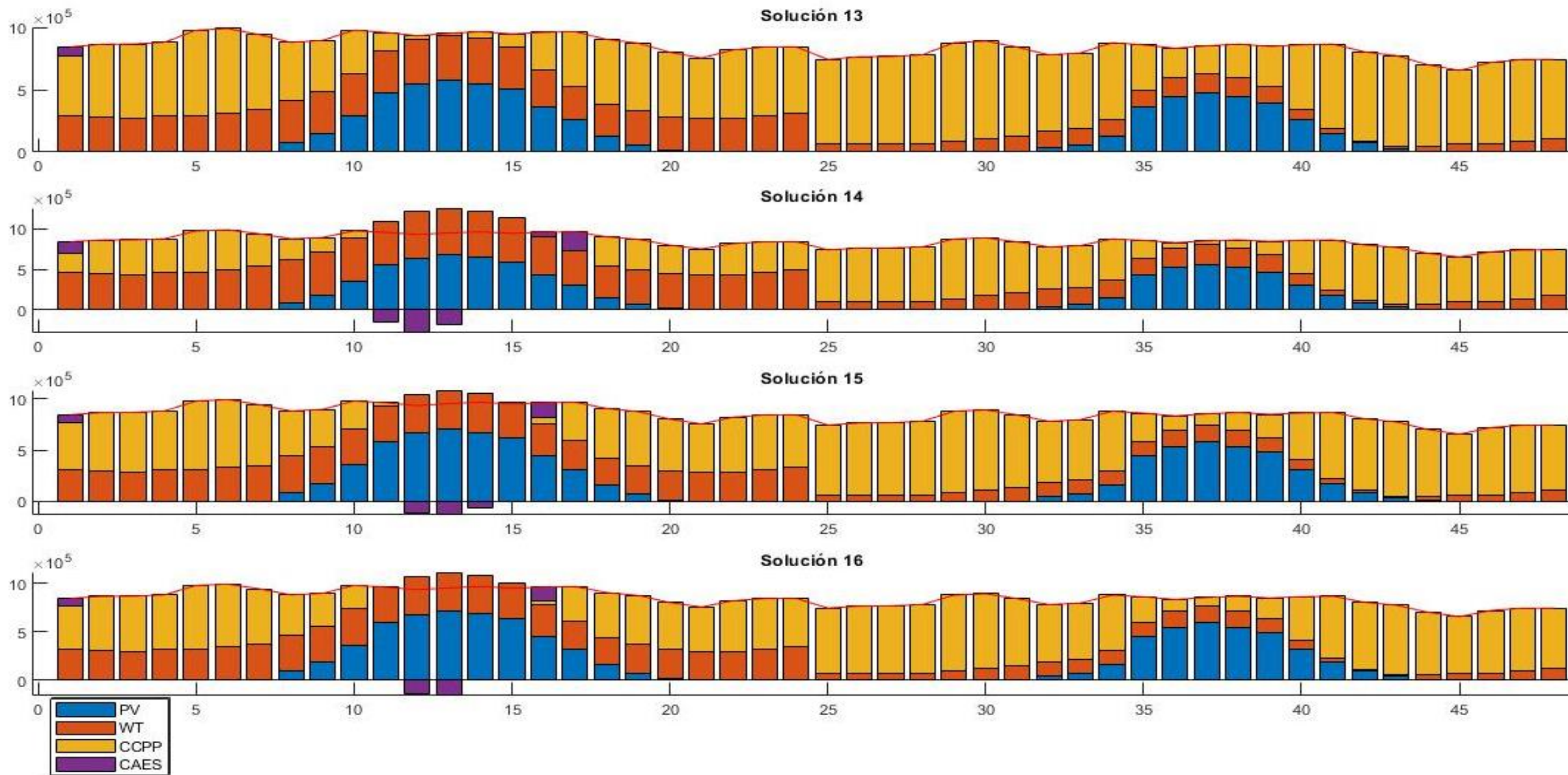
Soluciones de operación del EH caso 3.

CASO 3



Soluciones de operación del EH caso 3.

CASO 3



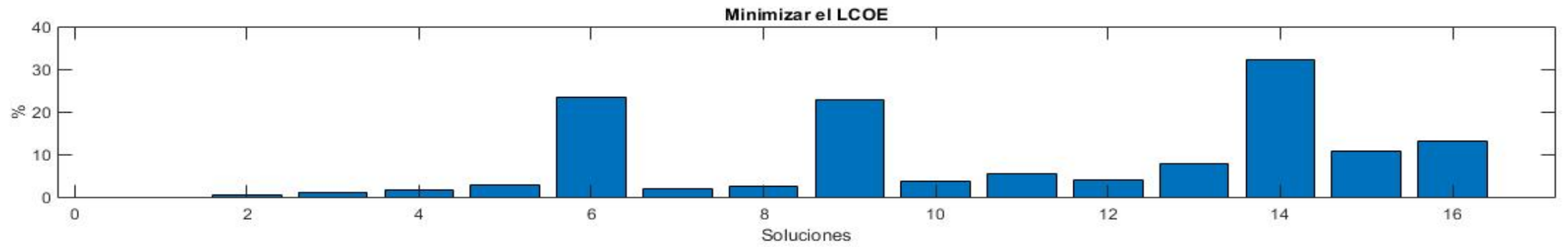
Soluciones de operación del EH caso 3.

CASO 3

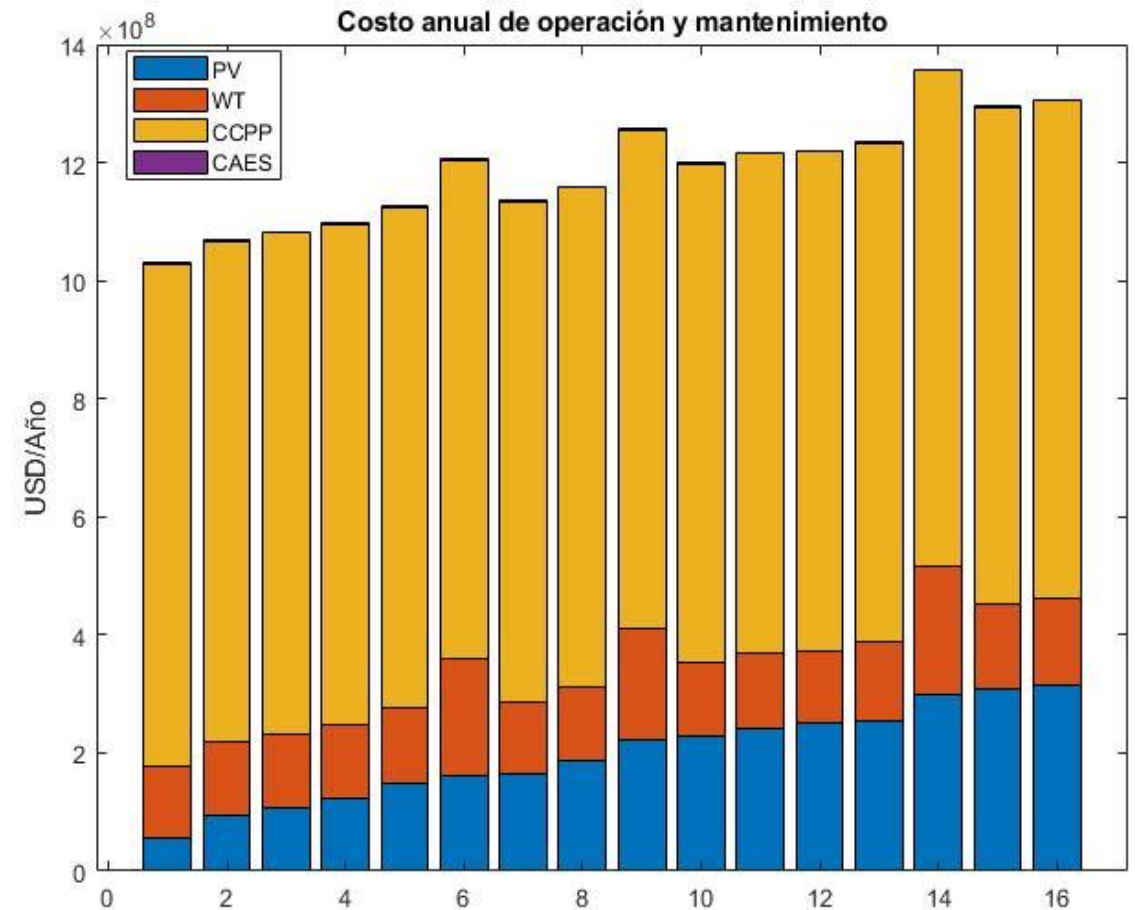
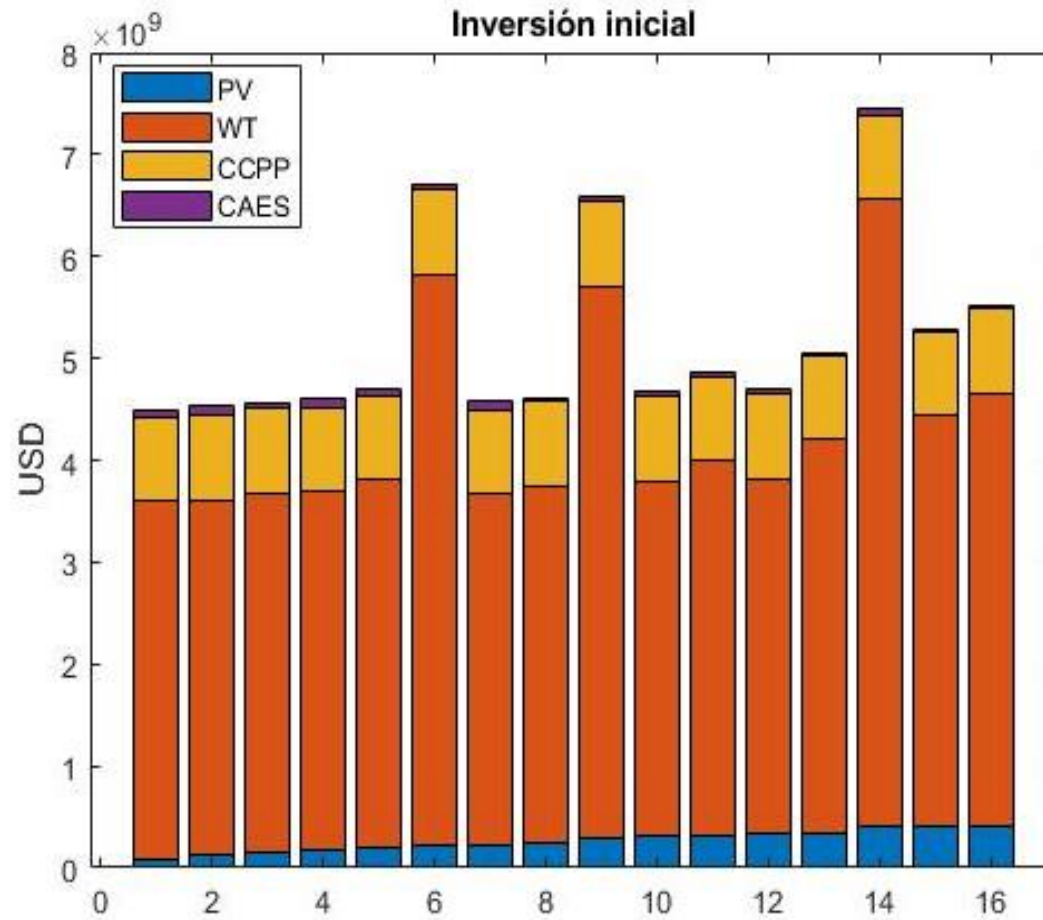
KIPs	KPI1	KPI2	KPI3	KPI4	KPI5	KPI6	KPI7	KPI8	KPI9	KPI10	KPI11	KPI12
Unidades	[%]	[%]	[%]	Horas/Año	Eventos/Año	kWh/Año	kWh/30 Años	\$ en 30 Años	\$/kWh	tCO2/30 años	kgSOx/30 años	kgNOx/30 años
KIPs optimizados	7.4	75%	100	0.1	0.00011	0.1	1	11,506,235,884	0.21	4,254,599	2,121819,7	1,927,446
	7.8	72%					1	11,603,370,798	0.21	4,271,228	2,117771,9	1,900,320
	8.1	71%					1	11,670,170,811	0.21	4,300,727	2,113079,8	1,888,768
	8.3	70%					1	11,731,169,880	0.21	4,303,774	2,108335,7	1,875,459
	8.9	68%					1	11,874,049,968	0.21	4,352,075	2,097586,5	1,849,993
	15.3	55%					1	14,226,203,157	0.25	4,826,331	1,828056,7	1,585,776
	8.7	68%					1	11,764,285,491	0.21	4,320,425	2,112204,4	1,856,280
	9.1	66%					1	11,815,033,894	0.21	4,363,000	2,112531,6	1,842,044
	15.9	52%					1	14,161,519,660	0.25	4,833,393	1,851009,9	1,573,895
	9.8	63%					1	11,959,852,537	0.21	4,389,449	2,103177,7	1,809,243
	10.5	62%					1	12,169,470,296	0.22	4,447,156	2,081669,8	1,782,557
	10.1	62%					1	12,010,773,194	0.21	4,404,932	2,101350,7	1,795,439
	11.3	60%					1	12,422,683,794	0.22	4,500,919	2,054735,2	1,749,917
	20.4	45%					3,173,562,864	15,253,168,482	0.27	5,139,000	1,792828,0	1,472,564
	12.8	56%					211,234,380	12,771,549,052	0.23	4,600,681	2,037648,4	1,701,010
13.6	54%	885,423,963	13,031,891,754	0.23	4,664,182	2,016456,3	1,677,754					
KIPs Línea Base	1.36	93	100	0,3	0,53	1802738	1	11,525,592,330	0,20	145,592,814	1,734,958,264	440,564,630

Tabla 15. KIPs optimizados en el modelo Caso 3.

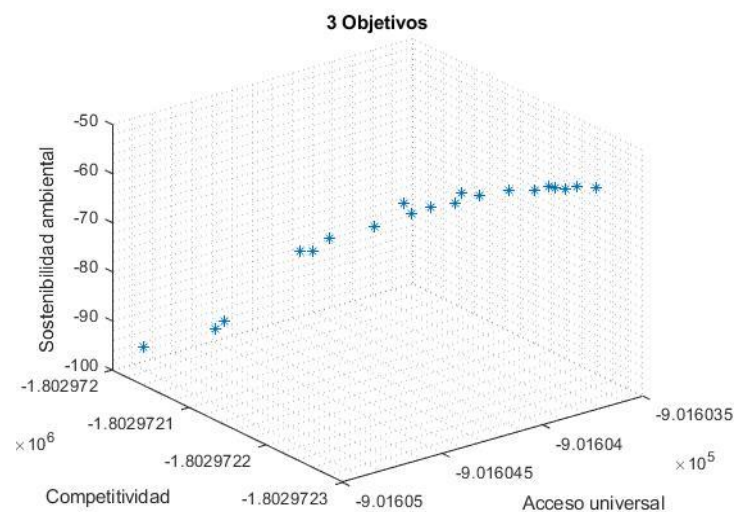
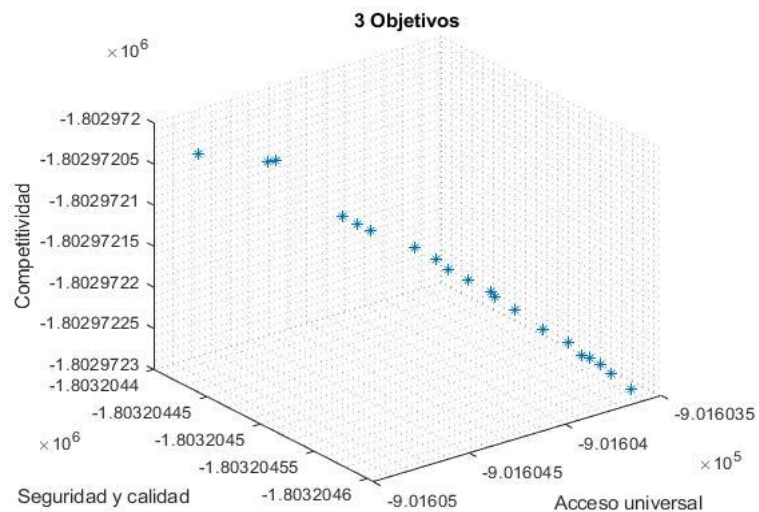
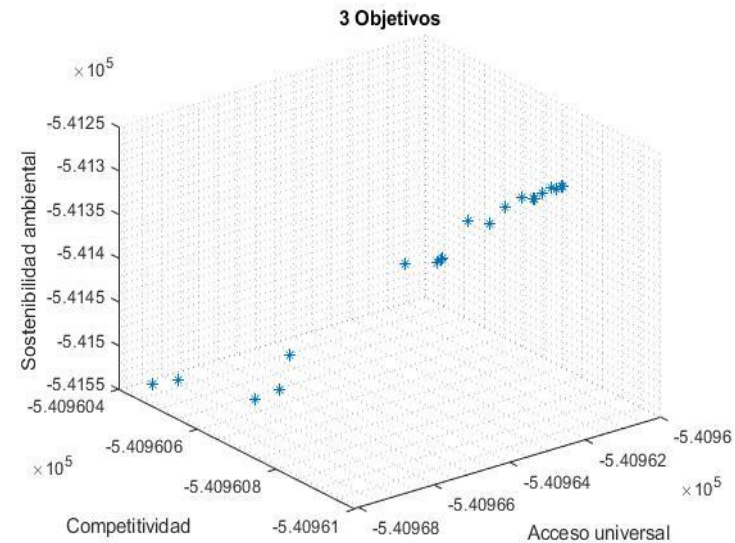
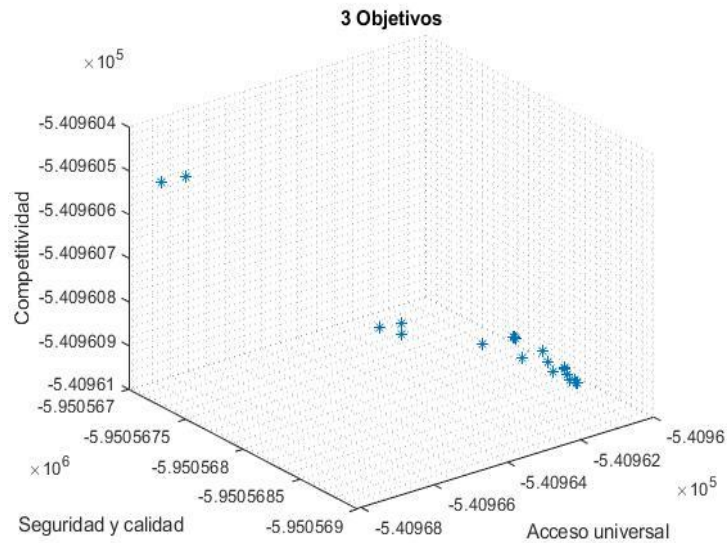
CASO 3



Diferencia porcentual entre el KPI9 del modelo y la Línea Base, para el caso 3.

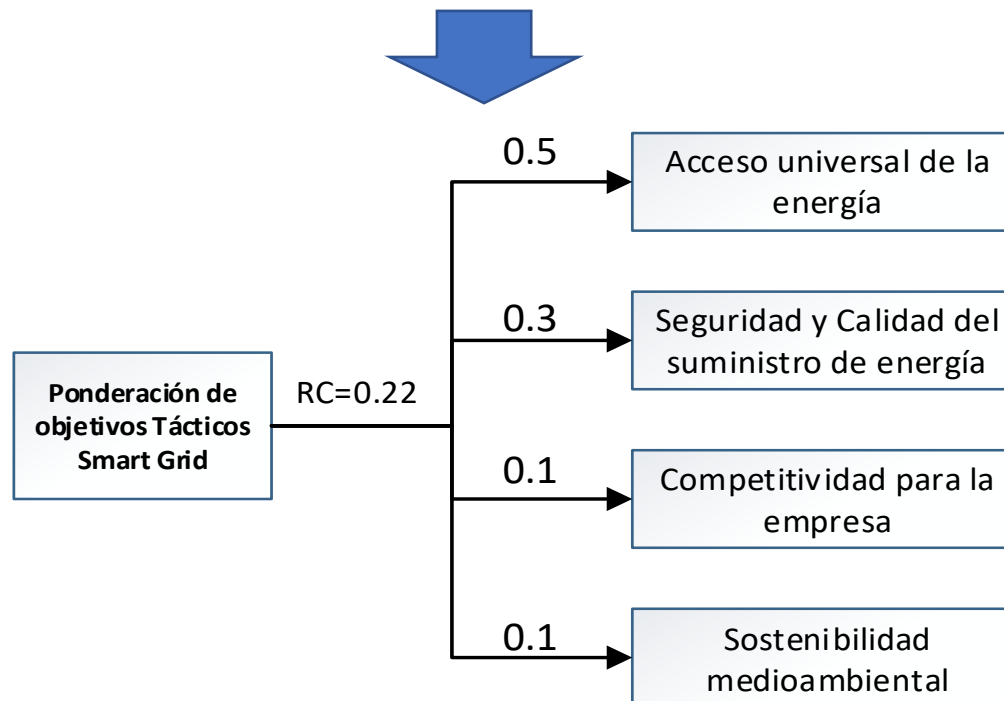


Selección de soluciones usando el método AHP



Selección de soluciones usando el método AHP

Propuesta lingüista y su correspondiente número triangular difuso.		
Escala de Saaty	Variable lingüística	Número Fuzzy
1	Igual de importante	(1,1,1)
3	Levemente importante	(2,3,4)
5	Medianamente importante	(4,5,6)
7	Muy importante	(6,7,8)
9	Absolutamente importante	(8,9,10)
2,4,6,8	Juicios intermedios	(1,2,3); (3,4,5);(5,6,7);(7,8,9)



Selección de soluciones usando el método AHP



Solución #	Número de Paneles	Número de Turbinas	Número de generadores de ciclo combinado	Número de CAES
4	0	744	2	1



Solución #	Número de Paneles	Número de Turbinas	Número de generadores de ciclo combinado	Número de CAES
12	1747389	1067	2	2



Solución #	Número de Paneles	Número de Turbinas	Número de generadores de ciclo combinado	Número de CAES
9	1658098	1405	2	2



CONCLUSIONES

Conclusiones

- Se propuso un modelo de optimización multi-objetivo / bi-nivel para la *planeación, diseño y operación* de proyectos *Smart Energy Hub* (SEH), caso de estudio de la Península de Yucatán.
- Se logró la optimización de cuatro objetivos en función de indicadores claves de desempeño, KPIs.
- El modelo presenta innovación a través del uso de herramientas de evaluación cualitativas de soporte a la toma de decisiones como el QFD y AHP difusos.
- Se dispone de una herramienta clave para transformar los juicios de los expertos en representaciones matemática e introducir pesos relativos de importancia al modelo de optimización.

Conclusiones

- La herramienta es capaz de integrar n subsistemas, con el fin de convertir el problema en uno de decisión multinivel con opción multi-seguidor o multi-lider, de naturaleza cooperativa, semi-cooperativa o no cooperativa.
- Con este trabajo, por ejemplo, se podría realizar la planeación y operación no solo de un proyecto SEH sino de varios de manera simultánea, por ejemplo, para una gran región con diferentes SEH interconectados o con opción de interconexión, incluso entre países completos.

