

Diseño y economía de una mini-red solar

Caso Kalobeyei, Kenya

4 ejercicios: determinista -> estacionalidad -> ICC -> comparación económica

PLATAFORMA Entren directamente a <http://autarky.open4cec.eu/project-setup> . Para los ejercicios deterministas pueden trabajar como invitados. Para el ejercicio ICC, creen una cuenta e inicien sesión antes de comenzar.

Objetivo general. Diseñar un sistema solar fotovoltaico + batería + generación diésel para una comunidad aislada, entender cómo cambian el tamaño óptimo y el costo cuando se introducen estacionalidad e incertidumbre, y comparar el flujo de caja de las alternativas.

Caso	Dato
Localidad	Kalobeyei, Turkana County, Kenya
Coordenadas	3.768 N, 34.622 E
Escala	~700 hogares; escuelas, dispensario y usos productivos
Demanda de referencia	pico ~80 kW; ~401 MWh/año
Horizonte económico	10 años
Tecnologías	Solar PV, batería y generador diésel

Nombre del equipo: _____ Fecha: _____

Cómo trabajar con la plataforma

En cada ejercicio sigan el asistente de Autarky hasta Results. No necesitan programar. El trabajo consiste en introducir los datos, ejecutar la optimización, leer los resultados y explicar por qué cambia el diseño.

Paso	Qué harán
1. Project setup	Ubicación, horizonte temporal, resolución horaria y estacionalidad.
2. System configuration	Seleccionar Solar PV, Battery, Diesel y el layout correspondiente.
3. Technology parameters	Costos, eficiencias, límites y parámetros del generador.
4. Load demand	Cargar el CSV de demanda.
5. Renewable potential	Cargar el CSV de recurso solar y pulsar Save antes de Next.
6. Model uncertainties	Elegir formulación determinista o ICC según el ejercicio.
7. Optimize	Ejecutar el optimizador.
8. Results	Registrar sizing, NPC, LCOE, combustible, renovables, curtailment y cash-flow.

ATENCIÓN Los campos numéricos se confirman al salir del campo o pulsar Tab. No recarguen la página ni escriban manualmente otra URL durante el wizard. En Renewable Potential pulsen Save antes de Next.

ENTREGA Cada equipo entrega las cuatro tablas de resultados, las respuestas razonadas y 2 capturas de pantalla: una del diseño determinista y otra del diseño ICC. Incluyan además una captura o transcripción del Cash Flow Analysis.

Datos económicos y técnicos comunes

Componente	Parámetro	Valor
Proyecto	Tasa de descuento	6.5 %
Proyecto	Max. lost load	0 %
Proyecto	Mín. renewable penetration	0 %
Proyecto	Max CAPEX	1,000,000 USD
Solar PV	Investment cost	1,200 USD/kW
Solar PV	O&M	1.8 % CAPEX/año
Solar PV	Lifetime	25 años
Batería	Investment cost	300 USD/kWh
Batería	O&M	2 % CAPEX/año
Batería	Lifetime	10 años
Batería	Charge / discharge time	4 h / 4 h
Batería	Eficiencia carga / descarga	93 % / 93 %
Batería	SOC min / max / inicial	20 % / 90 % / 50 %
Diésel	Investment cost	400 USD/kW
Diésel	O&M	4.5 % CAPEX/año
Diésel	Lifetime	20 años
Diésel	Nominal efficiency	30 %
Diésel	Fuel cost / LHV	1.3 USD/L / 10.14 kWh/L

Diseño determinista base

PREGUNTA CENTRAL ¿Cuál es la combinación de menor costo de PV, batería y diésel que satisface toda la demanda en un día representativo?

Archivos. Usen la carpeta Ex0-Base: generator_efficiency_curve.csv, load.csv y solar_production.csv.

A. Construcción del caso

1. Entren a <http://autarky.open4cec.eu/project-setup> y creen un proyecto llamado “Kalobeyei - Base determinista”.
2. Project setup: coordenadas 3.768 / 34.622; horizonte 10 años; resolución Hourly; 24 operation time steps; Seasonality OFF.
3. System configuration: seleccionen Solar PV, Battery y Diesel; Main Grid Connection OFF; Fully AC System ON; layout Hybrid Off-Grid AC-Coupled Minigrid.
4. Technology parameters: introduzcan los valores de la tabla común. Converter: eficiencia 100 % y capacidad sin límite. Subsidy solar = 0 %. En Diesel activen partial load, N Samples = 5, desactiven Fuel Consumption Limit y carguen generator_efficiency_curve.csv.
5. Load demand: Simulate with RAMP OFF y carguen load.csv.
6. Renewable potential: Generic PV, nominal capacity 1 kW; carguen solar_production.csv; pulsen Save y luego Next.
7. Model uncertainties: mantengan Autarky Linear Model.
8. Optimize: ejecuten el modelo y pasen a Results.

B. Registre el diseño óptimo

Indicador	Resultado del equipo
NPC [kUSD]	
Solar PV [kW]	
Batería [kWh]	
Generador diésel [kW]	
Penetración renovable [%]	
Consumo de combustible [L/año]	
LCOE [USD/kWh]	
Curtailment [% o MWh/año]	

EJERCICIO 1 - ANÁLISIS

Interpretar el óptimo

1. ¿Por qué el modelo podría mantener un generador diésel pequeño aunque exista mucha capacidad solar y batería?
2. ¿En qué horas del día esperaría que la batería cargue y en qué horas descargue? Explíquelo usando la forma de la demanda y del recurso solar.
3. ¿Qué parte del costo es CAPEX y qué parte corresponde a operación/combustible? Use el desglose mostrado en Results.
4. Localice Cash Flow Analysis. ¿En qué año se observa el punto de equilibrio o break-even, si existe dentro del horizonte de 10 años?
5. ¿Cuál es la principal limitación de usar un solo día representativo para decidir una inversión que operará durante 10 años?

Reto 1B - eficiencia de la batería

Repita exactamente el mismo caso, cambiando únicamente las eficiencias de carga y descarga de la batería de 93/93 a 98/98. Registre:

Indicador	Resultado del equipo
NPC [kUSD]	
Solar PV [kW]	
Batería [kWh]	
Diésel [kW]	
Penetración renovable [%]	

1. ¿El cambio del diseño es gradual o desaparece/entra alguna tecnología?
2. Explique económicamente por qué reducir pérdidas de almacenamiento puede sustituir capacidad de respaldo.

Estacionalidad: diseñar para un año desigual

PREGUNTA CENTRAL ¿Cómo cambia la inversión óptima cuando la estación húmeda tiene menos recurso solar que la estación seca?

Archivos. Usen la carpeta Ex1-Seasonality: generator_efficiency_curve.csv, load.csv y solar_production.csv.

A. Configure dos estaciones

Estación	Meses
Dry - 8 meses	Jan, Feb, Mar, Jun, Jul, Aug, Sep, Dec
Wet - 4 meses	Apr, May, Oct, Nov

1. Cree un proyecto nuevo: “Kalobeyei - Seasonality”. Active Seasonality y seleccione 2 seasons.
2. Asigne los meses a Dry y Wet exactamente como se indica arriba.
3. Mantenga Solar PV + Battery + Diesel y todos los costos y parámetros técnicos del Ejercicio 1.
4. Cargue los tres archivos de Ex1-Seasonality. Los CSV contienen columnas por estación.
5. Mantenga Autarky Linear Model y optimice.

B. Compare Base vs Seasonality

Indicador	Base	Seasonality	Cambio %
NPC [kUSD]			
PV [kW]			
Batería [kWh]			
Diésel [kW]			
Renovable [%]			
Combustible [L/año]			
Curtailment [%]			
LCOE [USD/kWh]			

EJERCICIO 2 - ANÁLISIS

Hedge contra la peor estación

1. ¿Qué estación determina con mayor fuerza el tamaño de PV y por qué?

2. ¿Aumenta el curtailment en la estación con mejor recurso solar? Explique la lógica económica.

3. ¿El modelo responde a la estacionalidad con más PV, más batería, más diésel o una combinación? Use sus números.

4. Calcule el incremento de NPC por incorporar estacionalidad: $\Delta NPC = NPC_{\text{estacional}} - NPC_{\text{base}}$.

5. ¿Qué interpretación económica tiene ese Delta NPC? Proponga un nombre: por ejemplo, “costo de representar la estacionalidad”.

6. Compare el flujo de caja de ambos casos. ¿Qué años cambian más y qué componente explica la diferencia?

PISTA No busquen una respuesta “solar siempre gana” o “batería siempre gana”. La optimización elige la combinación de menor costo total dentro de las restricciones y las pérdidas del sistema.

Diseño bajo incertidumbre con Individual Chance Constraints

PREGUNTA CENTRAL ¿Cuánto cuesta diseñar no solo para el perfil esperado, sino para alcanzar un nivel explícito de confiabilidad frente a la incertidumbre?

Antes de empezar. Creen una cuenta en Autarky e inicien sesión. Para aislar el efecto de la formulación, vuelvan a usar los archivos de Ex0-Base y mantengan exactamente los mismos costos y parámetros del Ejercicio 1.

A. Caso ICC

1. Cree un proyecto nuevo: “Kalobeyei - ICC”. Mantenga 10 años, Hourly, 24 pasos y Seasonality OFF.
2. Seleccione Solar PV + Battery + Diesel y use exactamente los parámetros del caso Base.
3. Cargue load.csv, solar_production.csv y generator_efficiency_curve.csv de Ex0-Base.
4. En Model uncertainties seleccione la formulación de Individual Chance Constraints (ICC).
5. **Configure una confiabilidad individual $p = 90\%$. Si la interfaz solicita epsilon en vez de p , use $\epsilon = 0.10$.**
6. Mantenga las demás hipótesis de incertidumbre indicadas por el docente o por la configuración del curso; no cambie simultáneamente costos o tecnologías.
7. Optimice y registre todos los resultados.

QUÉ SIGNIFICA ICC La condición de confiabilidad se exige para cada periodo por separado. Conceptualmente: $\text{Prob}\{\text{el sistema puede cubrir la condición requerida en la hora } t\} \geq p$, para cada t . Una ICC no significa que todo el día completo satisfaga simultáneamente ese mismo porcentaje.

B. Registre el resultado ICC

Indicador	Resultado del equipo
Nivel de confiabilidad p	90 %
NPC [kUSD]	
Solar PV [kW]	
Batería [kWh]	
Diésel [kW]	
Penetración renovable [%]	
Combustible [L/año]	
LCOE [USD/kWh]	

EJERCICIO 3 - SENSIBILIDAD

El precio de la confiabilidad

Si el tiempo de clase lo permite, repita el ICC con tres niveles de confiabilidad. No cambie ningún otro parámetro. La pregunta central es observar si, al subir p de 0.80 a 0.90 y 0.95, el sistema se vuelve más grande y/o más caro, y qué tecnología aporta ese margen adicional de confiabilidad.

p	NPC [kUSD]	PV [kW]	Batería [kWh]	Diésel [kW]	LCOE
80 %					
90 %					
95 %					

1. Al aumentar p de 0.80 a 0.90 y 0.95, ¿el sistema se hace más grande? Identifique qué capacidad crece primero: PV, batería o diésel, y explique por qué.

2. Calcule el costo incremental de confiabilidad entre 80 % y 90 %, y entre 90 % y 95 %.

3. ¿El sistema se hace más caro al aumentar p ? Calcule el cambio en NPC y LCOE. ¿El incremento de costo es lineal con p ?

4. ¿Qué diferencia conceptual existe entre “0 % maximum lost load” en el caso determinista y una restricción probabilística ICC?

5. ¿Por qué una ICC con $p = 0.90$ o $p = 0.95$ por hora no equivale a decir que el sistema funcionará sin fallo durante 90 % o 95 % de todos los días?

ENTREGA ICC Incluya una captura de Model uncertainties donde se vea la formulación ICC y el nivel de confiabilidad utilizado. Esto permite reproducir el resultado.

Comparación técnico-económica y flujo de caja

PREGUNTA CENTRAL ¿Qué se compra con el costo adicional del diseño ICC, y cómo se refleja esa decisión en el flujo de caja?

A. Tabla final de diseños

Indicador	Determinista Base	Seasonality	ICC 90 %
NPC [kUSD]			
PV [kW]			
Batería [kWh]			
Diésel [kW]			
Renovable [%]			
Combustible [L/año]			
LCOE [USD/kWh]			
Curtailement			
Break-even [año]			

B. Indicadores que deben calcular

Indicador	Fórmula	Resultado
Prima de incertidumbre	$NPC_ICC - NPC_Base$	
Prima relativa	$(NPC_ICC/NPC_Base - 1) \times 100 \%$	
Costo de estacionalidad	$NPC_Seasonality - NPC_Base$	
Cambio de LCOE	$LCOE_ICC - LCOE_Base$	
PV adicional ICC	$PV_ICC - PV_Base$	
Batería adicional ICC	$Bat_ICC - Bat_Base$	
Respaldo adicional ICC	$Diesel_ICC - Diesel_Base$	

C. Cash-flow

En Results, baje hasta Cash Flow Analysis. Para Base e ICC, anote o capture el gráfico año por año. Identifique inversión inicial, costos recurrentes, combustible, reemplazos y el momento en que el flujo acumulado cambia de signo, si ocurre.

Indicador	Resultado del equipo
CAPEX inicial Base [USD]	
CAPEX inicial ICC [USD]	
Costo combustible acumulado Base [USD]	
Costo combustible acumulado ICC [USD]	
Año de reemplazo de batería, si aparece	
Break-even Base [año]	
Break-even ICC [año]	

EJERCICIO 4 - DECISIÓN

Defender una recomendación

1. ¿Qué diseño tiene mayor NPC? Explique por qué un diseño más caro puede ser económicamente racional si reduce exposición al riesgo.

2. Compare CAPEX inicial y costos operativos. ¿El ICC desplaza costo desde combustible hacia inversión, o sucede lo contrario?

3. ¿Qué componente explica la mayor parte de la diferencia de flujo de caja entre Base e ICC?

4. Si el inversionista tuviera un presupuesto inicial muy limitado, ¿qué tensión aparece entre CAPEX, LCOE y confiabilidad?

5. Si el combustible subiera 30 %, ¿qué diseño cree que sería menos sensible? Formule una hipótesis antes de volver a correr el modelo.

6. Redacte una recomendación final de máximo 120 palabras. Debe citar al menos cuatro resultados numéricos y explicar el trade-off costo-confiabilidad.

D. Conclusión del equipo

Diseño recomendado: _____

RECUERDE El objetivo no es encontrar un único “ganador”, sino entender qué compra cada formulación: menor costo esperado, cobertura de variabilidad estacional o mayor confiabilidad frente a incertidumbre.

Nota docente/fuente del caso: Ejercicio adaptado del material Autarky Hands-on Optimization Class para Kalobeyei, Kenya. Los parámetros deterministas, archivos y flujo del wizard siguen el story deck y walkthrough proporcionados. La parte ICC se añade como extensión de comparación bajo incertidumbre.