

**Fecha de recepción: 13 marzo 2024**

**Fecha de corrección: 5 abril 2024**

Mario Santizo, PhD, MEng<sup>1</sup>

## **RESUMEN**

El **método de Monte Carlo** es un método no determinista o estadístico numérico, usado para aproximar expresiones complejas y costosas de evaluar con exactitud. El método se llamó así en referencia al Casino de Monte Carlo (Principado de Mónaco) por ser "la capital del juego de azar", al ser la ruleta un generador simple de números aleatorios. El nombre y el desarrollo sistemático de los métodos de Monte Carlo datan aproximadamente de 1944 y se mejoró con el desarrollo de la computadora.

El uso de los métodos de Monte Carlo como herramienta de investigación, proviene del

trabajo realizado en el desarrollo de la bomba atómica durante la Segunda Guerra Mundial en el Laboratorio Nacional de Los Álamos en Estados Unidos de Norteamérica. Este trabajo simulación de problemas probabilísticos de hidrodinámica concernientes a la difusión de neutrones en el material de fisión. Esta difusión posee un comportamiento eminentemente aleatorio. En la actualidad es parte fundamental de los algoritmos de Raytracing para la generación de imágenes 3D. En este artículo se determina el método de Montecarlo para determinar la fiabilidad de un ciclo combinado en Guatemala.

## **Palabras clave:**

Método de Montecarlo, fiabilidad, Ciclos de potencia

## **ABSTRACT**

The Monte Carlo method is a numerical non-deterministic or statistical method used to approximate complex and expensive mathematical expressions to evaluate accurately. The method was named in reference to the Casino of Monte Carlo (Monaco) as "the capital of gambling," roulette being a simple random number generator. The name and the systematic development of Monte Carlo methods dating from about 1944 and greatly improved with the development of the computer.

Using Monte Carlo methods as a research tool, it comes from the work done in developing the atomic bomb during World War II at Los Alamos National Laboratory in the US. UU. This work involved the probabilistic simulation of hydrodynamics problems concerning neutron diffusion in fissile material. This diffusion has a highly random behavior. Today it is a fundamental part of raytracing algorithms to generate 3D images. In this article the Monte Carlo method is determined to determine the reliability of a combined cycle plant in Guatemala.

**Keywords:** Monte Carlo method, reliability, maintenance power cycles.

<sup>1</sup>PhD en Eficiencia Energética, MEng. En Energía Renovable y Eficiencia Energética. PhD in Sciences of Engineering, Atlantic International University – The School of Science and Engineering, EEUU.

Profesor de los cursos de Operaciones Unitarias, y de Energía. Código 472 del Registro Nacional de Investigadores del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYT) Dominio [www.proenergia.org](http://www.proenergia.org) e email: [proenergia.com@gmail.com](mailto:proenergia.com@gmail.com)

**Fecha de recepción: 13 marzo 2024**

**Fecha de corrección: 5 abril 2024**

## **INTRODUCCIÓN**

La presente investigación contempla uno de los principales problemas de la industria de generación de energía eléctrica en el país, la disponibilidad y confiabilidad de los motores de combustión interna de ciclo combinado para generación de electricidad.

El siglo veinte se caracterizó por la creciente demanda de energía, la cual en forma de corriente eléctrica pasó de ser una curiosidad de las ferias a un bien obligatorio para todos los hogares. Sin embargo, la forma en que se genera evolucionó relativamente poco en los últimos 50 años, dado que de forma general no cambio, pero su eficiencia si creció esto con el fin de satisfacer el mercado. Luego se busco formas más eficientes y fuentes más económicas para generar electricidad lo que llevo a uso de recursos naturales. En el caso de Guatemala uno de los principales son los recursos hídricos de las represas, ya que la geografía accidentada del país lo permite.

Aparte de la eficiencia hay que tomar en cuenta el acceso y la capacidad de operación de los equipos, el mantenimiento, la vida útil, el tiempo y el costo de reparación y mantenimiento, todos estos valores se tienen que monitorear continuamente, es necesario

## **ANTECEDENTES**

Las actividades de operación y mantenimiento en las plantas generadoras diésel se miden con parámetros que, enfocados a la toma de decisiones, son señales del monitoreo de su administración, de esa manera se verifica que las actividades vayan en el sentido correcto y permiten evaluar los resultados.

Estas señales son conocidas como indicadores de gestión que son la expresión cuantitativa del comportamiento o desempeño de un proceso, en este caso la operación y mantenimiento de la maquinaria, cuya magnitud, al ser comparada con niveles de referencia, puede estar señalando alguna

establecer un nivel de referencia, el cual debe de ser cuantificable para ello se evalúan la disponibilidad y la confiabilidad.

La primera de ellas consiste en la fracción del tiempo en que el equipo opera más la fracción de tiempo en receso, donde puede trabajar sin retrasos. La confiabilidad consiste en la probabilidad que equivale a la cantidad de tiempo en que el equipo opera sin fallas en un intervalo de tiempo.

Este informe describe la disponibilidad y la confiabilidad desde dos puntos de vista el primero de ellos es, el de mantenimiento en el cual, con datos históricos para un año, se calculan estos dos indicadores de manera mensual para dos generadoras siendo éstas: Generadora Centro América y la Generadora Cristal ambas con dos motores.

Estos datos históricos proporcionan información con la cual se genera una simulación mediante el método de Montecarlo el cual toma los valores históricos diarios reunidos en periodos mensuales para determinar el rango de operación con medidas de tendencia central con las cuales se genera una simulación diaria durante un periodo de un año. Lo que da un segundo informe de confiabilidad y disponibilidad.

desviación sobre la cual se toman acciones correctivas o preventivas, según sea el caso. Un indicador es una medida de la condición de un proceso o evento en un momento determinado. Los indicadores en conjunto pueden proporcionar un panorama de la situación operativa, de mantenimiento o cualquier proceso en general de la planta generadora.

Empleándolos en forma oportuna y actualizada, los indicadores permiten tener control adecuado sobre una situación dada, la principal razón de su importancia radica en que es posible predecir y actuar con base a

# Disponibilidad y fiabilidad de ciclos combinados de potencia en Guatemala utilizando la simulación de Montecarlo

**Fecha de recepción: 13 marzo 2024**

**Fecha de corrección: 5 abril 2024**

las tendencias positivas o negativas observadas en su desempeño global.

Los indicadores son una forma clave de retroalimentar la operación y mantenimiento de la planta, y son más importantes todavía si el tiempo de respuesta es inmediato, o muy corto, ya que de esta manera las acciones correctivas son realizadas sin demora y de forma oportuna.

No es necesario tener bajo control continuo muchos indicadores, solamente los más importantes, los claves. Los indicadores que engloben fácilmente el desempeño total de la planta generadora deben recibir la máxima prioridad. Los indicadores de máxima prioridad para la operación y mantenimiento de la central diesel son la disponibilidad y confiabilidad de la maquinaria, por supuesto existen otra serie de indicadores de control en la operación global de la planta.

Los principales beneficios derivados de los indicadores de disponibilidad y confiabilidad en la operación de la planta se pueden enumerar:

A. Monitoreo de la operación y mantenimiento de la maquinaria de la planta: el mejoramiento continuo sólo es posible si se hace un seguimiento exhaustivo a cada eslabón de la cadena Operativa del proceso de generación de energía eléctrica. Las mediciones son las herramientas básicas, no sólo para detectar las oportunidades de mejora, sino además para implementar las acciones.

B. Benchmarking: si una planta generadora pretende mejorar sus procesos, una alternativa es traspasar sus fronteras y conocer el entorno para aprender e implementar lo aprendido, una forma de lograrlo es a través del benchmarking para evaluar procesos y actividades y compararlos con los de otra central generadora diesel de similar equipo. Esta práctica es más fácil si se cuenta con la implementación de los indicadores como referencia.

C. Gerencia del cambio: un adecuado sistema de medición les permite a las personas

conocer el aporte en las metas de la organización las cuáles son los resultados que soportan la afirmación de que lo están realizando bien. Las características que tienen los indicadores de disponibilidad y confiabilidad son simplicidad, adecuación (entendido como la facilidad de la medida para describir por completo el fenómeno o efecto; refleja la magnitud del hecho realizado y muestra la desviación real del nivel deseado), valido en el tiempo, útil y oportuno (capacidad para que los datos sean recolectados a tiempo e igualmente requiere que la información sea analizada oportunamente para poder actuar).

Los indicadores de disponibilidad y confiabilidad resultan ser una manifestación de los objetivos estratégicos de la organización a partir de su Misión; igualmente, resultan de la necesidad de asegurar la integración entre los resultados operacionales y estratégicos de la generadora y reflejan la estrategia corporativa a todos los empleados.

Los elementos de los indicadores de disponibilidad y confiabilidad principalmente son:

1. La definición: expresión que cuantifica el estado de la característica o hecho que quiere ser controlado.

2. El objetivo: es lo que persigue el indicador seleccionado, indica el mejoramiento que se busca y el sentido de esa mejora, en el caso de disponibilidad y confiabilidad es la maximización. El objetivo en consecuencia permite seleccionar y combinar acciones preventivas y correctivas en una sola dirección.

3. Los valores de referencia: el acto de medir es realizado a través de la comparación y esta no es posible si no se cuenta con un nivel de referencia para comparar el valor de un indicador.

4. La responsabilidad: clarifica el modo de actuar frente a la información que suministre el indicador y su posible desviación respecto a las referencias escogidas.

# Disponibilidad y fiabilidad de ciclos combinados de potencia en Guatemala utilizando la simulación de Montecarlo

**Fecha de recepción: 13 marzo 2024**

5. Los puntos de medición: define la forma como se obtienen y conforman los datos, los sitios y momento donde deben hacerse las mediciones, los medios con los cuales hacer las medidas, quiénes hacen las lecturas y cual es el procedimiento de obtención de las muestras. Ello permite establecer con claridad la manera de obtener precisión, oportunidad y confiabilidad en las medidas.

6. La periodicidad: define el periodo de la realización de la medida, cómo se presentan los datos, cuando realizan las lecturas puntuales y promedios.

7. El sistema de procesamiento y toma de decisiones, el sistema de información debe garantizar que los datos obtenidos de la recopilación de históricos o lecturas, sean presentados adecuadamente al momento de la toma de decisiones. Un reporte para tomar decisiones debe contener no solo el valor actual del indicador, sino también el nivel de referencia.

Para definir los indicadores de disponibilidad y confiabilidad de control en el proceso de operación y mantenimiento de la central diesel, es importante el monitoreo de forma continua, ya que el seguimiento tiene un costo alto cuando no esta soportado por un verdadero beneficio.

Podemos entonces definir la disponibilidad como la cantidad de tiempo que esta disponible un equipo para formar parte de un proceso productivo o también como el tiempo total durante el cual el equipo se encuentra operando satisfactoriamente, más el tiempo que estando en receso, puede trabajar sin contratiempos durante un período.

Su propósito es identificar y cuantificar los tiempos de interrupción del servicio de los activos.

La fórmula para realizar el cálculo de la disponibilidad mensual de un motor en la central de generación diesel esta dado por:

**Fecha de corrección: 5 abril 2024**

% Disponibilidad =

$$\frac{(\sum \text{horas operación} + \sum \text{horas standby})}{(\sum \text{horas operación} + \sum \text{horas standby} + \sum \text{horas mtto no planificado} + \sum \text{horas mtto correctivo planificado} + \sum \text{horas mtto preventivo})}$$

Un valor de disponibilidad entre un 93 a 95% se considera muy bueno, acorde a los contratos entre operadores y propietarios de las centrales diesel. La confiabilidad es el grado de confianza que nos da un equipo que no fallará en un período de tiempo determinado o también es la probabilidad de que un equipo pueda operar sin fallar durante un período estipulado.

El estudio de la confiabilidad es el estudio de fallos de un componente, si se tiene un equipo sin fallo se dice que el equipo es cien por ciento confiable. Su propósito es asegurar el servicio continuo de los activos.

La fórmula para realizar el cálculo de la confiabilidad mensual de un motor en la central de generación diesel esta dado por:

% Confiabilidad =

$$\frac{(\sum \text{horas operación} + \sum \text{horas standby})}{(\sum \text{horas operación} + \sum \text{horas standby} + \sum \text{horas mtto no planificado})}$$

La confiabilidad siempre es mayor o igual a la disponibilidad, el aumento de la confiabilidad (disminución de imprevistos) trae enormes beneficios económicos, en especial porque el proceso de generación de energía eléctrica posee alto costo por perdida de producción.

Los elementos que atentan contra la confiabilidad del sistema de producción de energía eléctrica son:

1. Incorrecta operación de motores y/o equipos auxiliares.
2. Incorrecta estrategia de mantenimiento
3. Imprevistos
4. Problemas de diseño y fabricación

Para minimizar índices bajos de disponibilidad y confiabilidad es necesario tomar en cuenta los siguientes puntos:

# Disponibilidad y fiabilidad de ciclos combinados de potencia en Guatemala utilizando la simulación de Montecarlo

Fecha de recepción: 13 marzo 2024

Fecha de corrección: 5 abril 2024

1. Estrategias de capacitación de operadores y personal de mantenimiento.
2. Estrategias de mantenimiento predictivo (Análisis de síntomas emitidos por los equipos), mantenimiento proactivo (minimizar causa raíz de falla) y monitoreo de condiciones (análisis periódico de vibraciones, análisis de aceite y partículas de desgaste, tomografía, ultrasonido, monitoreo de defectos eléctricos).
3. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad RCM<sup>1</sup>
4. Mantenimiento Productivo Total TPM<sup>2</sup>

## MÉTODO DE MONTECARLO

La primera simulación es la cantidad de potencia generada por día, para ello se toma el diferencial diario y se promedia esto luego de quitar los días de paro. Eliminando los días de paro, se busca el mínimo y máximo los cuales son los límites para este valor. El siguiente paso consiste en la determinación de la probabilidad de un día de paro total lo cual consta de la cantidad de días de paro entre la cantidad de días del mes, proporcionando una probabilidad, para la simulación. Lo que consiste en generar números aleatorios entre 0 y 1 y si este es inferior a la probabilidad se considera como paro y se da un valor de 0 para la generación Diaria y por ende al horómetro y al consumo de combustible.

Para la simulación del horómetro se realiza un par de pasos previos el primero es determinar la razón entre la generación diaria y la cantidad de horas que opera el equipo lo que nos proporciona un coeficiente el cual posee valores dependientes a las horas de operación y como independiente la generación agregando la limitación de que si el resultado máximo es 24. finalmente, el valor de consumo de HFO<sup>3</sup> del horómetro, según (Dimov, 2008), es una función igual a la del horómetro.

<sup>1</sup> Reliability Centred Maintenance

<sup>2</sup> Total Productive Maintenance

<sup>3</sup> combustibles

## Datos originales y calculados

Los datos originales son las lecturas de los diversos equipos los cuales proporcionan la información original. En el caso del método de mantenimiento, son lecturas de las plantas de ciclo combinado que dieron acceso a ellos y son las que se analizan en este informe, pero según (Dimov, 2008) para la simulación de Montecarlo se eliminan los días de paro y se simula la cantidad de horas y así como el consumo de combustible ya que ambos son variables que determinan la operación del equipo.

A continuación, durante el resto del estudio se presentan toda la información original y calculada de las plantas en estudio:

## Cálculo de confiabilidad y disponibilidad Método de mantenimiento

**Tabla No. 1** fuente de las tablas (Santizo, Planta ciclo combinado centroamérica de 15 MW, 2008)

### Generadora Centroamérica motor 1. Consumo específico

Período	Promedio de Consumo de HFO	Promedio de Consumo Especifico	Energía Generada Planta	Promedio de carga mensual Planta	Producción Nominal Planta <sup>4</sup>	Eficiencia Energética
meses	$\frac{Kwh}{gal}$	$\frac{gal_{HFO}}{Kwh}$	Kwh	Kw	Kwh	%
Diciembre/2007	16.33	229.42	1,680,278.00	4,785.56	2,613,400.00	64.29
Enero/2008	16.65	239.64	1,226,329.00	4,613.44	1,825,000.00	67.20
Febrero/2008	16.76	223.49	2,743,464.00	6,251.48	3,160,900.00	86.79
Marzo/2008	16.61	225.31	1,660,822.00	5,520.00	2,073,200.00	80.11
Abril/2008	16.65	226.60	1,596,325.00	5,621.42	2,007,500.00	79.52
Mayo/2008	16.03	237.39	1,666,014.00	4,983.12	2,452,800.00	67.92
Junio/2008	14.67	246.23	959,312.00	4,399.78	1,540,300.00	62.28
Julio/2008	16.21	240.04	1,307,207.00	5,068.18	1,876,100.00	69.68
Agosto/2008	16.37	229.00	1,592,332.00	5,179.51	2,117,000.00	75.22
Septiembre/2008	16.79	222.80	1,764,528.00	5,395.92	2,299,500.00	76.74
Octubre/2008	16.79	224.09	2,057,464.00	5,301.21	2,701,000.00	76.17
Noviembre/2008	16.75	224.04	2,257,165.00	5,318.88	3,117,100.00	72.41

<sup>4</sup> Es el equivalente a la producción continua de la planta.

# Disponibilidad y fiabilidad de ciclos combinados de potencia en Guatemala utilizando la simulación de Montecarlo

Fecha de recepción: 13 marzo 2024

Fecha de corrección: 5 abril 2024

**Tabla No. 2.** Consumo de combustible para la GCA 1<sup>5</sup>, según (Santizo, Planta ciclo combinado centroamérica de 15 MW, 2008).

Período	HFO		Diesel		Lubricantes
	Consumo (gal)	Ingreso (gal)	Consumo (gal)	Ingreso (gal)	Consumo (gal)
Diciembre/2007	103,130.86	152,900.00	508.00	0.00	272.60
Enero/2008	75,184.42	160,005.39	83.48	0.00	526.60
Febrero/2008	163,379.75	454,600.00	0.00	0.00	1,028.50
Marzo/2008	99,427.49	75,700.00	73.18	0.00	874.20
Abril/2008	95,727.50	423,400.00	0.00	0.00	524.30
Mayo/2008	103,532.37	732,245.84	300.10	0.00	1,134.90
Junio/2008	61,824.15	0.00	200.90	0.00	566.80
Julio/2008	80,760.27	531,954.00	376.97	0.00	422.80
Agosto/2008	96,418.19	708,329.00	434.56	3,300.00	883.80
Septiembre/2008	103,893.90	507,406.00	486.08	1,600.00	522.90
Octubre/2008	121,864.00	488,467.00	240.13	0.00	677.20
Noviembre/2008	134,122.41	586,928.00	351.91	750.00	884.50

**Tabla 4.** Disponibilidad y confiabilidad GCA 1(Santizo, Planta ciclo combinado centroamérica de 15 MW, 2008)

Período	DISPONIBILIDAD	CONFIABILIDAD	UTILIZACIÓN
Diciembre/2007	100.00	100.00	24.00
Enero/2008	97.00	100.00	34.00
Febrero/2008	99.71	99.71	62.39
Marzo/2008	99.33	99.86	38.22
Abril/2008	98.33	100.00	38.19
Mayo/2008	99.60	99.60	45.34
Junio/2008	97.50	100.00	29.31
Julio/2008	93.55	99.71	34.64
Agosto/2008	98.52	100.00	38.98
Septiembre/2008	99.72	100.00	43.75
Octubre/2008	97.31	99.59	49.93
Noviembre/2008	97.78	100.00	59.31
Diciembre/2007	100.00	100.00	24.00

**Tabla No. 3** horas de operación GCA 1 (Santizo, Planta ciclo combinado centroamérica de 15 MW, 2008).

Período	Operación	Operación	Std-by	Std-by	MPP <sup>6</sup>	MPP	MCP <sup>7</sup>	MCP	MPNP <sup>8</sup>	MPNP
	h/mes	%	h/mes	%	h/mes	%	h/mes	%	h/mes	%
Diciembre/2007	176	23.66%	568	76.34%	0	0%	0	0%	0	0%
Enero/2008	250	34%	472	63%	20	3%	3	0%	0	0%
Febrero/2008	433	62%	261	38%	0	0%	0	0%	2	0%
Marzo/2008	284	91.50%	455	5.11%	0	2.29%	4	0.90%	0	0.00%
Abril/2008	433	60.14%	11	1.53%	1	0.14%	0	0.00%	0	0.00%
Mayo/2008	336	45.16%	405	54.44%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%
Junio/2008	211	29.31%	491	68.19%	0	0.00%	18	2.50%	0	0.00%
Julio/2008	257	34.54%	439	59.01%	40.5	5.44%	5.5	0.74%	0	0.0%
Agosto/2008	290	39.0%	443	59.5%	0	0.0%	11	1.5%	0	0.0%
Septiembre/2008	315	43.75%	403	55.97%	1	0.14%	1	0.14%	0	0.00%
Octubre/2008	370	49.73%	354	47.58%	2	0.27%	15	2.02%	3	0.40%
Noviembre/2008	427	59.31%	277	38.47%	14	1.94%	2	0.28%	0	0.00%

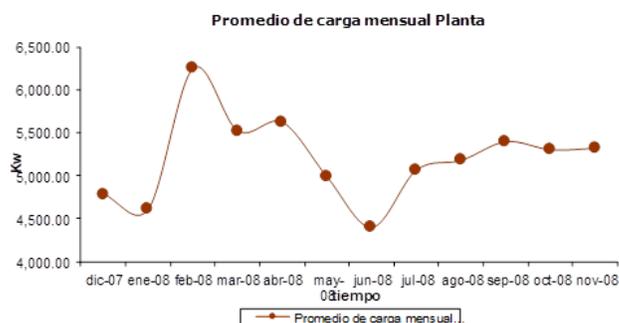
<sup>5</sup> Se unificaron los ingresos en el motor 1 de la generadora Centro América.

<sup>6</sup> MPP = Mantenimiento preventivo planificado

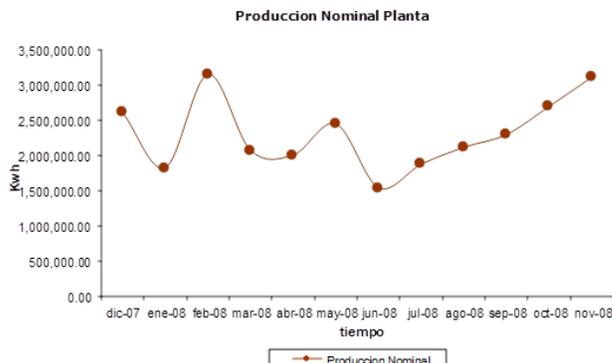
<sup>7</sup> MCP = Mantenimiento correctivo planificado

<sup>8</sup> MPNP = Mantenimiento correctivo no planificado

**Gráfico 1.** Promedio de Carga mensual GCA 1. [Kw]



**Gráfico 2.** Producción nominal mensual GCA 1. [Kwh]

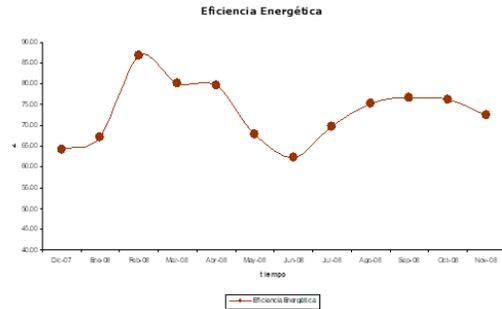


# Disponibilidad y fiabilidad de ciclos combinados de potencia en Guatemala utilizando la simulación de Montecarlo

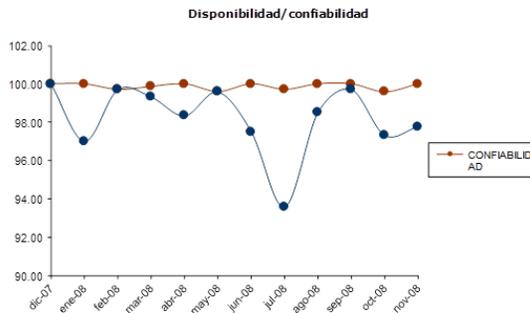
Fecha de recepción: 13 marzo 2024

Fecha de corrección: 5 abril 2024

**Gráfico 3. Eficiencia mensual de GCA 1.**  
[%]



**Gráfico 4. Disponibilidad y confiabilidad de la GCA 1.**  
[%]



## Generadora Centroamérica motor 2.

**Tabla 5. Consumo específico de GCA 2.**

Período	Promedio de Consumo de HFO	Promedio de Consumo Específico	Energía Generada Planta	Promedio de carga mensual Planta	Producción Nominal Planta <sup>9</sup>	Eficiencia Energética
Meses	$\frac{Kwh}{gal}$	$\frac{gal_{HFO}}{Kwh}$	Kwh	Kw	Kwh	%
Diciembre/2007	16.26	235.32	772,342.00	4,297.08	1,284,800.00	60.11
Enero/2008	16.38	237.17	1,165,065.00	4,928.29	1,598,700.00	72.88
Febrero/2008	16.43	227.68	2,666,644.00	6,459.71	3,014,900.00	88.45
Marzo/2008	16.32	234.50	1,899,379.00	5,508.95	2,503,900.00	75.86
Abril/2008	16.50	228.22	1,787,399.00	5,179.12	2,482,000.00	72.01
Mayo/2008	16.13	232.33	1,834,045.00	5,399.11	2,584,200.00	70.97
Junio/2008	15.44	242.98	1,947,556.00	4,421.01	3,117,100.00	62.48

<sup>9</sup> Es el equivalente a la producción continua de la planta.

Julio/2008	16.09	241.14	1,262,684.00	4,652.21	1,832,300.00	68.91
Agosto/2008	16.42	229.15	1,713,066.00	5,189.63	2,263,000.00	75.70
Septiembre/2008	16.31	229.36	2,229,026.00	5,546.10	2,847,000.00	78.29
Octubre/2008	16.09	236.10	2,482,343.00	5,166.67	3,518,600.00	70.55
Noviembre/2008	16.53	226.52	1,724,957.00	5,428.77	2,343,300.00	73.61

**Tabla 6. Consumo de combustible para GCA 2<sup>10</sup>.**

Período	HFO		Diesel		Lubricantes
	Consumo (gal)	Ingreso (gal)	Consumo (gal)	Ingreso (gal)	Consumo (gal)
Diciembre/2007	48063		315		
Enero/2008	71978		89		
Febrero/2008	162115		0		
Marzo/2008	117035		133		
Abril/2008	108463		572		
Mayo/2008	113231		53		
Junio/2008	124280		49		
Julio/2008	79061		118		
Agosto/2008	102579		532		
Septiembre/2008	135730		488		
Octubre/2008	155792		206		
Noviembre/2008	104099		269		

**Tabla 7. Horas de operación para GCA 2.**

Período	Operación	Operación	Std-by	Std-by	MPP <sup>11</sup>	MMP	MCP <sup>12</sup>	MCP	MPNP <sup>13</sup>	MPNP
	h/mes	%	h/mes	%	h/mes	%	h/mes	%	h/mes	%
Diciembre/2007	182.00	24.46%	562.00	75.54%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%
Enero/2008	219.00	29.44%	524.00	70.43%	1.00	0.13%	0.00	0.00%	0.00	0.00%
Febrero/2008	413.00	59.34%	283.00	40.66%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%
Marzo/2008	343.00	91.50%	385.00	5.11%	15.00	2.29%	1.00	0.90%	0.00	0.00%
Abril/2008	340.00	47.22%	324.50	45.07%	43.50	6.04%	12.00	1.67%	12.00	1.67%
Mayo/2008	354.00	47.58%	387.00	52.02%	0.00	0.00%	2.00	0.27%	2.00	0.27%
Junio/2008	427.00	59.31%	287.00	39.86%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	5.00	0.69%
Julio/2008	251.00	33.74%	474.50	63.78%	7.50	1.01%	11.00	1.48%	0.00	0.00%
Agosto/2008	310.00	41.67%	392.00	52.69%	11.50	1.55%	30.50	4.10%	0.00	0.00%
Septiembre/2008	390.00	54.17%	327.50	45.49%	1.50	0.21%	1.00	0.14%	0.00	0.00%
Octubre/2008	248.50	33.40%	2.50	0.34%	11.00	1.48%	0.00	0.00%	0.00	0.00%
Noviembre/2008	321.00	44.58%	364.50	50.63%	0.50	0.07%	33.00	4.58%	1.00	0.14%

<sup>10</sup> Se omiten los valores de ingreso ya que estos se obtienen unificados para el motor 1 de cal generadora Centro América.

<sup>11</sup> MPP = Mantenimiento preventivo planificado

<sup>12</sup> MCP = Mantenimiento correctivo planificado

<sup>13</sup> MPNP = Mantenimiento correctivo no planificado

# Disponibilidad y fiabilidad de ciclos combinados de potencia en Guatemala utilizando la simulación de Montecarlo

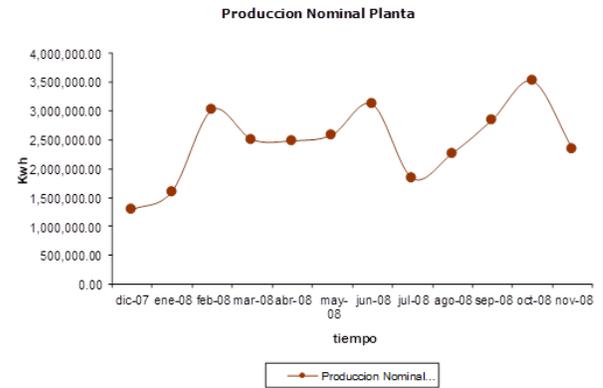
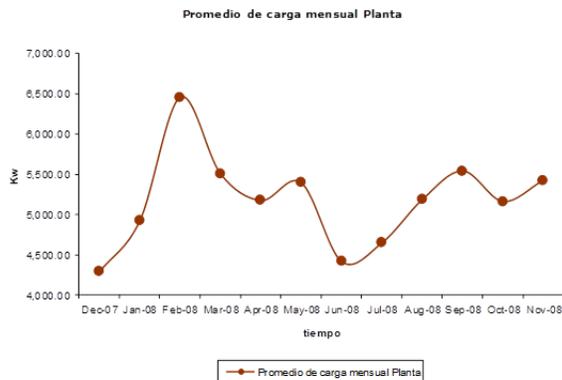
**Fecha de recepción: 13 marzo 2024**

**Fecha de corrección: 5 abril 2024**

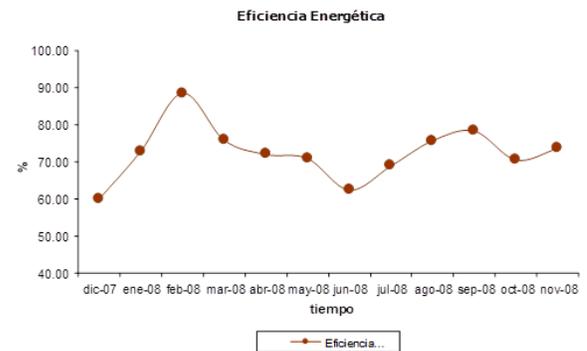
**Tabla 8.** Disponibilidad y confiabilidad GCA 2 (Santizo, Planta ciclo combinado centroamérica de 15 MW, 2008)

Período	DISPONIBILIDAD	CONFIABILIDAD	UTILIZACIÓN
Diciembre/2007	100.00	100.00	24.00
Enero/2008	99.87	100.00	29.44
Febrero/2008	100.00	100.00	59.34
Marzo/2008	97.85	100.00	46.10
Abril/2008	92.29	100.00	47.22
Mayo/2008	99.60	99.87	47.64
Junio/2008	99.17	99.86	59.39
Julio/2008	97.51	100.00	33.74
Agosto/2008	94.35	100.00	41.67
Septiembre/2008	99.65	100.00	54.17
Octubre/2008	98.19	100.00	64.78
Noviembre/2008	95.21	99.85	44.65
Diciembre/2007	100.00	100.00	24.00

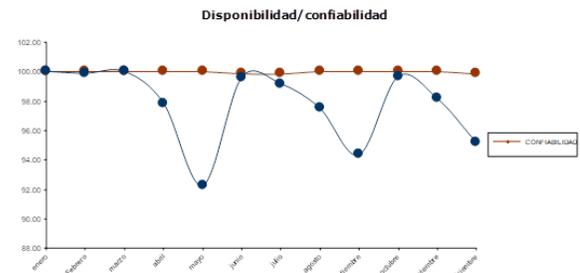
**Gráfico 5** Promedio de Carga mensual GCA 2. [Kw]



**Gráfico 7.** Eficiencia mensual de la GCA 2. [%]



**Gráfico 8.** Disponibilidad y confiabilidad GCA 2 [%]



# Disponibilidad y fiabilidad de ciclos combinados de potencia en Guatemala utilizando la simulación de Montecarlo

**Fecha de recepción: 13 marzo 2024**

**Fecha de corrección: 5 abril 2024**

## Generadora Cristal motor 1.

**Tabla11.** Horas de operación Cristal 1. (Santizo, Planta ciclo combinado Cristal 10 MW, 2008)

**Tabla9.** Consumo específico de Cristal 1 (Generadora cristal motor 1)

Período	Promedio de Consumo de HFO	Promedio de Consumo Especifico	Energía Generada Planta	Promedio de carga mensual Planta	Producción Nominal Planta <sup>14</sup>	Eficiencia Energética
Meses	$\frac{Kwh}{gal}$	$\frac{gal_{HFO}}{Kwh}$	Kwh	Kw	Kwh	%
Diciembre/2007	16.33	229.42	1,680,278.00	4,785.56	2,613,400.00	64.29
Enero/2008	16.65	239.64	1,226,329.00	4,613.44	1,825,000.00	67.20
Febrero/2008	16.76	223.49	2,743,464.00	6,251.48	3,160,900.00	86.79
Marzo/2008	16.61	225.31	1,660,822.00	5,520.00	2,073,200.00	80.11
Abril/2008	16.65	226.60	1,596,325.00	5,621.42	2,007,500.00	79.52
Mayo/2008	16.03	237.39	1,666,014.00	4,983.12	2,452,800.00	67.92
Junio/2008	14.67	246.23	959,312.00	4,399.78	1,540,300.00	62.28
Julio/2008	16.21	240.04	1,307,207.00	5,068.18	1,876,100.00	69.68
Agosto/2008	16.37	229.00	1,592,332.00	5,179.51	2,117,000.00	75.22
Septiembre/2008	16.79	222.80	1,764,528.00	5,395.92	2,299,500.00	76.74
Octubre/2008	16.79	224.09	2,057,464.00	5,301.21	2,701,000.00	76.17
Noviembre/2008	16.75	224.04	2,257,165.00	5,318.88	3,117,100.00	72.41

Período	Operación h/mes	Operación %	Std-by h/mes	Std-by %	MPP <sup>15</sup> h/mes	MMP %	MCP <sup>17</sup> h/mes	MCP %	MPNP <sup>18</sup> h/mes	MPNP %
Diciembre/2007	730	98.12%	0	0.00%	14	1.88%	0	0.00%	0	0.00%
Enero/2008	716	96.2%	0	0%	25	3.4%	0	0%	3	0.4%
Febrero/2008	586	84%	0	0%	63.5	9%	0	0%	46.5	7%
Marzo/2008	725	97.4%	3	0.4%	14	1.9%	0	0.0%	2	0.3%
Abril/2008	706	98%	2	0%	12	2%	0	0%	0	0%
Mayo/2008	678	91%	1	0%	22	3%	0	0%	43	6%
Junio/2008	686	95.3%	8.5	1.2%	19.5	2.7%	0	0.0%	6	0.8%
Julio/2008	688	92%	10	1%	0	0%	36	5%	0	0%
Agosto/2008	719	96.6%	3	0.4%	18	2.4%	0	0.0%	4	0.5%
Septiembre/2008	709	98.5%	0	0.0%	9	1.3%	0	0.0%	2	0.3%
Octubre/2008	719	96.6%	1	0.1%	17	2.3%	0	0.0%	7	0.9%
Noviembre/2008	667.5	93%	7	1%	18	3%	0	0%	27.5	4%

**Tabla 10.** Consumo de combustible para Cristal 1<sup>15</sup>.

**Tabla 12.** Disponibilidad y confiabilidad Cristal 1 (Santizo, Planta ciclo combinado Cristal 10 MW, 2008)

Período	HFO		Diesel		Lubricantes
	Consumo (gal)	Ingreso (gal)	Consumo (gal)	Ingreso (gal)	Consumo (gal)
Diciembre/2007	170,855.98	306,445.00	388.01	0.00	3,827.10
Enero/2008	165,756.91	278,148.0	486.64	0.00	2,264.10
Febrero/2008	138,924.48	437,337.0	539.80	9,000.00	2,194.50
Marzo/2008	174,221.65	285,617.0	399.66	0.00	2,182.20
Abril/2008	170,560.11	309,932.0	790.01	0.00	2,311.20
Mayo/2008	161,884.57	320,315.0	483.50	8,000.00	1,935.30
Junio/2008	142,590.85	288,134.0	603.35	0.00	904.60
Julio/2008	154,641.48	303,597.0	553.52	8,000.00	1,738.70
Agosto/2008	169,844.70	342,912.0	731.15	0.00	2,763.42
Septiembre/2008	175,309.29	356,795.0	366.76	0.00	1,634.00
Octubre/2008	170,477.09	352,262.0	468.63	9,000.00	2,486.70
Noviembre/2008	154,712.35	384,831.0	443.83	0.00	2,073.80

Período	DISPONIBILIDAD	CONFIABILIDAD	UTILIZACIÓN
Diciembre/2007	98.12	100.00	98.12
Enero/2008	96.24	99.58	96.24
Febrero/2008	84.20	92.65	84.20
Marzo/2008	97.85	99.73	97.45
Abril/2008	98.33	100.00	98.06
Mayo/2008	91.26	94.04	91.13
Junio/2008	96.46	99.14	95.28
Julio/2008	93.82	95.10	92.47
Agosto/2008	97.04	99.45	96.64
Septiembre/2008	98.47	99.72	98.47
Octubre/2008	96.77	99.04	96.64
Noviembre/2008	93.68	96.08	92.71
Diciembre/2007	98.12	100.00	98.12

<sup>14</sup> Es el equivalente a la producción continua de la planta.

<sup>15</sup> Se unificaron los ingresos en el motor 1 de la generadora Cristal.

<sup>16</sup> MPP = Mantenimiento preventivo planificado

<sup>17</sup> MCP = Mantenimiento correctivo planificado

<sup>18</sup> MPNP = Mantenimiento correctivo no planificado

# Disponibilidad y fiabilidad de ciclos combinados de potencia en Guatemala utilizando la simulación de Montecarlo

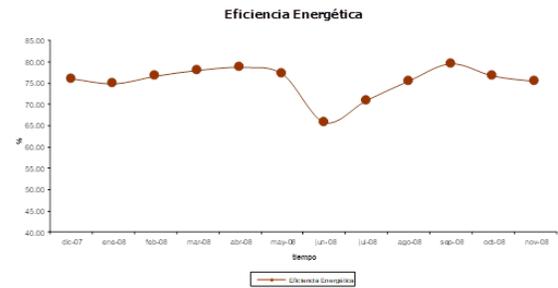
Fecha de recepción: 13 marzo 2024

Fecha de corrección: 5 abril 2024

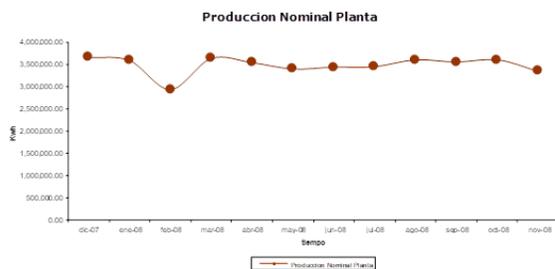
**Gráfico 9.** Promedio de Carga mensual Cristal 1. [Kw]



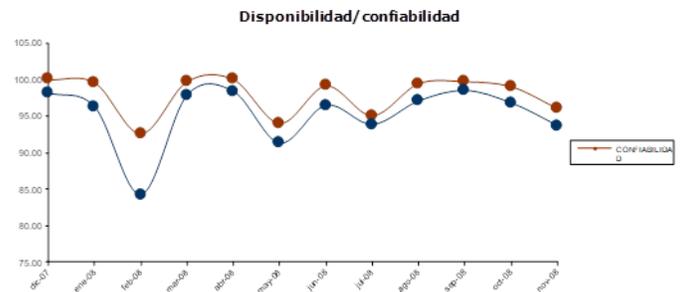
**Gráfico 11.** Eficiencia mensual de GCA 1. [%]



**Gráfico 10.** Producción nominal mensual Cristal 1. [Kwh]



**Gráfico 12.** Disponibilidad y confiabilidad de la GCA 1. [%]



# Disponibilidad y fiabilidad de ciclos combinados de potencia en Guatemala utilizando la simulación de Montecarlo

Fecha de recepción: 13 marzo2024

Fecha de corrección: 5 abril2024

## 5.1.4 Generadora Cristal motor 2.

**Tabla13.** Consumo específico de Cristal 2. (Santizo, Planta ciclo combinado Cristal 10 MW, 2008)

Período	Promedio de Consumo de HFO	Promedio de Consumo Específico	Energía Generada Planta	Promedio de carga mensual Planta	Producción Nominal Planta <sup>19</sup>	Eficiencia Energética
Meses	$\frac{Kwh}{gal}$	$\frac{gal_{HFO}}{Kwh}$	Kwh	Kw	Kwh	%
Diciembre/2007	16.27	229.99	2,723,193.00	3,724.10	3,655,000.00	74.51
Enero/2008	16.16	231.47	2,624,611.00	3,643.58	3,600,000.00	72.91
Febrero/2008	16.28	229.87	2,317,734.00	3,752.21	3,085,000.00	75.13
Marzo/2008	16.29	229.69	2,775,951.00	3,849.20	3,605,000.00	77.00
Abril/2008	16.31	229.36	2,656,037.00	3,883.08	3,420,000.00	77.66
Mayo/2008	15.94	234.72	2,303,940.00	3,291.30	3,500,000.00	65.83
Junio/2008	15.83	236.38	2,168,137.00	3,391.18	3,160,000.00	68.61
Julio/2008	15.83	236.38	2,168,137.00	3,391.18	3,160,000.00	68.61
Agosto/2008	16.14	231.81	2,745,991.00	3,909.40	3,510,000.00	78.23
Septiembre/2008	16.14	231.81	2,745,991.00	3,909.40	3,510,000.00	78.23
Octubre/2008	16.17	231.36	2,745,925.00	3,804.31	3,605,000.00	76.17
Noviembre/2008	16.30	229.47	2,392,900.00	3,694.51	3,235,000.00	73.97

**Tabla 14.** Consumo de combustible para Cristal 2<sup>20</sup> (Santizo, Planta ciclo combinado Cristal 10 MW, 2008)

Período	HFO	Diesel
meses	Consumo (gal)	Ingreso (gal) Consumo (gal)
Diciembre/2007	166,755.54	634.40
Enero/2008	161,844.88	523.15
Febrero/2008	140,150.68	2,116.51
Marzo/2008	170,038.63	405.15
Abril/2008	161,982.01	827.19
Mayo/2008	143,916.92	603.66
Junio/2008	135,504.63	1,164.23
Julio/2008	135,504.63	1,164.23
Agosto/2008	147,658.54	957.07
Septiembre/2008	169,649.72	527.20
Octubre/2008	169,223.55	613.82
Noviembre/2008	146,356.93	369.26

<sup>19</sup> Es el equivalente a la producción continua de la planta.

<sup>20</sup> Se omiten los valores de ingreso ya que estos se obtienen unificados para el motor 1 de cal generadora Centro América.

**Tabla 15.** Horas de operación para Cristal 2.

Período	Operación	Operación	Std-by	Std-by	MPP <sup>21</sup>	MMP	MCP <sup>22</sup>	MCP	MPNP <sup>23</sup>	MPNP
	h/mes	%	h/mes	%	h/mes	%	h/mes	%	h/mes	%
Diciembre/2007	731	98.25%	0	0.00%	11	1.48%	0	0.00%	2	0.27%
Enero/2008	720	97%	0	0%	24	3%	0	0%	0	0%
Febrero/2008	617	89%	1	0%	73	10%	0	0%	5	1%
Marzo/2008	721	96.9%	3	0.4%	4	0.5%	0	0.0%	16	2.2%
Abril/2008	684	95%	2	0%	21	3%	13	2%	0	0%
Mayo/2008	700	97.2%	10	1.4%	8.5	1.2%	0	0.0%	1.5	0.2%
Junio/2008	632	85%	81	11%	27.5	4%	0	0%	3.5	0%
Julio/2008	632	85%	81	11%	27.5	4%	0	0%	3.5	0%
Agosto/2008	654	87.9%	2	0.3%	21	2.8%	0	0.0%	67	9.0%
Septiembre/2008	702	97.5%	0	0%	11	2%	0	0%	7	1%
Octubre/2008	721	100.1%	1	0.1%	21	2.9%	0	0.0%	1	0.1%
Noviembre/2008	647	90%	7	1%	63	9%	0	0%	3	0%

**Tabla 16.** Disponibilidad y confiabilidad Cristal 2

Período	DISPONIBILIDAD	CONFIABILIDAD	UTILIZACIÓN
Diciembre/2007	98.25	99.73	98.25
Enero/2008	96.77	100.00	96.77
Febrero/2008	88.79	99.20	88.65
Marzo/2008	97.31	97.84	96.91
Abril/2008	95.28	100.00	95.00
Mayo/2008	98.61	99.79	97.22
Junio/2008	95.83	99.51	84.95
Julio/2008	95.83	99.51	84.95
Agosto/2008	88.17	90.73	87.90
Septiembre/2008	99.01	99.01	97.50
Octubre/2008	97.04	99.86	96.91
Noviembre/2008	90.83	99.54	89.86
Diciembre/2007	98.25	99.73	98.25

<sup>21</sup> MPP = Mantenimiento preventivo planificado

<sup>22</sup> MCP = Mantenimiento correctivo planificado

<sup>23</sup> MPNP = Mantenimiento correctivo no planificado

# Disponibilidad y fiabilidad de ciclos combinados de potencia en Guatemala utilizando la simulación de Montecarlo

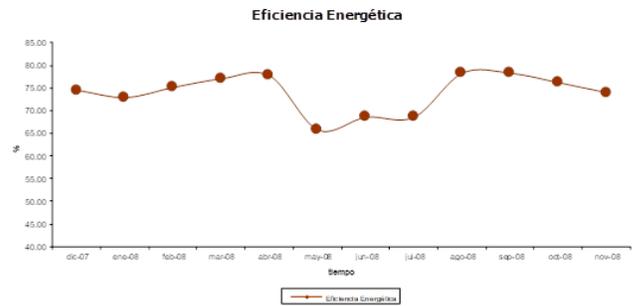
Fecha de recepción: 13 marzo 2024

Fecha de corrección: 5 abril 2024

**Gráfico 13.** Promedio de Carga mensual Cristal 2. [Kw]



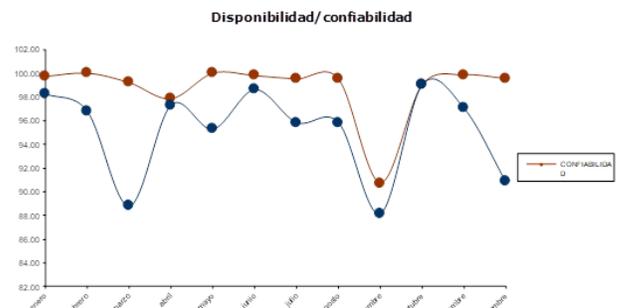
**Gráfico 15.** Eficiencia mensual de la GCA 2. [%]



**Gráfico 14.** Producción nominal mensual GCA 2. [Kwh]



**Gráfico 16.** Disponibilidad y confiabilidad GCA 2 [%]



# Disponibilidad y fiabilidad de ciclos combinados de potencia en Guatemala utilizando la simulación de Montecarlo

Fecha de recepción: 13 marzo 2024

Fecha de corrección: 5 abril 2024

## SIMULACIÓN DE MONTECARLO

### GENERADORA CRISTAL

**Tabla 17.** Simulación utilizando en método de Montecarlo para la generación y consumo específico de la generadora Cristal (Santizo, Planta ciclo combinado Cristal 10 MW, 2008)

Período	Promedio de Consumo de HFO	Promedio de Consumo Específico	Energía Generada Planta	Promedio de carga mensual Planta	Producción Nominal Planta <sup>24</sup>	Eficiencia Energética
Meses	<i>Kwh gal</i>	<i>gal<sub>HFO</sub> Kwh</i>	<i>Kwh</i>	<i>Kw</i>	<i>Kwh</i>	%
Enero	1,548.15	50.40	4,519,989.00	7,327.56	6,164,597.36	73.32
Febrero	1,900.62	118.68	4,365,203.00	7,137.42	6,097,132.63	71.59
Marzo	1,902.27	115.34	5,181,373.00	7,305.27	7,085,000.00	73.13
Abril	27.03	164.83	5,122,599.00	7,767.64	6,588,202.85	77.75
Mayo	1,911.63	49.90	3,519,660.00	5,056.85	7,080,000.00	49.71
Junio	1,911.63	49.90	3,885,532.00	5,791.64	6,710,000.00	57.91
Julio	1,900.62	118.68	4,365,203.00	7,137.42	6,097,132.63	71.59
Agosto	879.73	298.12	4,431,534.00	7,636.85	5,777,214.45	76.71
septiembre	3,785.41	0.99	5,257,743.00	7,900.98	6,660,047.92	78.94
Octubre	1,900.77	116.51	5,136,918.00	7,555.14	6,790,493.82	75.65
noviembre	3,785.41	0.99	3,774,177.00	8,696.48	4,810,537.31	78.46
Diciembre	1,911.63	49.90	5,041,894.00	7,511.20	6,711,938.02	75.12

**Tabla 18.** Simulación utilizando en método de Montecarlo para consumo de combustible para la Generadora Cristal. (Santizo, Planta ciclo combinado Cristal 10 MW, 2008)

Período	HFO		Diesel		Lubricantes
	Consumo (gal)	Ingreso (gal)	Consumo (gal)	Ingreso (gal)	Consumo (gal)
Enero	103,130.86	152,900.00	508.00	0.00	272.60
Febrero	147,162.33	160,005.39	172.50	0.00	526.60
Marzo	325,495.00	454,600.00	0.00	0.00	1,028.50
Abril	216,462.05	75,700.00	205.79	0.00	874.20
Mayo	204,190.73	423,400.00	572.20	0.00	524.30
Junio	216,763.87	732,245.84	352.93	0.00	1,134.90
Julio	0.00	0.00	250.30	0.00	566.80
Agosto	159,821.22	531,954.00	494.79	0.00	422.80
septiembre	199,907.48	708,329.00	927.42	3,300.00	883.80
Octubre	239,624.21	507,406.00	974.53	1,600.00	522.90
noviembre	277,655.86	488,467.00	446.19	0.00	677.20

<sup>24</sup> Es el equivalente a la producción continua de la planta.

diciembre	216,462.05	75,700.00	205.79	0.00	884.50
-----------	------------	-----------	--------	------	--------

**Tabla 19.** Simulación utilizando en método de Montecarlo para las Horas de operación para la generadora Cristal. (Santizo, Planta ciclo combinado Cristal 10 MW, 2008)

Período	Operación	Operación	Std-by	Std-by	MPP <sup>25</sup>	MMP	MCP <sup>26</sup>	MCP	MPN <sup>27</sup>	MPNP
	h/mes	%	h/mes	%	h/mes	%	h/mes	%	h/mes	%
enero	616.46	82.86%	109.75	14.75%	24.50	3.29%	0.00	0.00%	1.50	0.20%
febrero	609.71	81.95%	98.17	13.20%	18.75	2.52%	0.00	0.00%	19.75	2.65%
marzo	708.50	95.23%	27.00	3.63%	9.00	1.21%	0.00	0.00%	9.00	1.21%
abril	658.82	91.50%	36.81	5.11%	16.50	2.29%	6.50	0.90%	0.00	0.00%
mayo	708.00	95.16%	24.50	3.29%	17.50	2.35%	0.00	0.00%	44.00	5.91%
junio	671.00	93.19%	26.25	3.65%	14.00	1.94%	0.00	0.00%	3.75	0.52%
julio	609.71	81.95%	98.17	13.20%	18.75	2.52%	0.00	0.00%	19.75	2.65%
agosto	577.72	77.65%	92.40	12.42%	19.50	2.62%	0.00	0.00%	35.50	4.77%
septiembre	666.00	92.50%	42.49	5.90%	10.00	1.39%	0.00	0.00%	4.50	0.63%
octubre	679.05	91.27%	43.39	5.83%	19.00	2.55%	0.00	0.00%	4.00	0.54%
noviembre	481.05	66.81%	186.20	25.86%	40.50	5.63%	0.00	0.00%	15.25	2.12%
diciembre	671.19	90.21%	53.27	7.16%	12.50	1.68%	0.00	0.00%	1.00	0.13%

**Tabla 20.** Disponibilidad y confiabilidad [GCA 1] (Santizo, Planta ciclo combinado centroamérica de 15 MW, 2008)

Período	DISPONIBILIDAD	CONFIABILIDAD	UTILIZACIÓN
enero	96.55%	99.80%	81.97%
febrero	94.84%	97.32%	81.70%
marzo	97.61%	98.79%	94.06%
abril	96.80%	100.00%	91.66%
mayo	92.26%	94.33%	89.17%
junio	97.53%	99.47%	93.86%
julio	94.84%	97.32%	81.70%
agosto	92.40%	94.95%	79.65%
septiembre	98.00%	99.37%	92.13%
octubre	96.91%	99.45%	91.10%
noviembre	92.34%	97.73%	66.18%
diciembre	98.17%	99.86%	90.95%
enero	96.55%	99.80%	81.97%

<sup>25</sup> MPP = Mantenimiento preventivo planificado

<sup>26</sup> MCP = Mantenimiento correctivo planificado

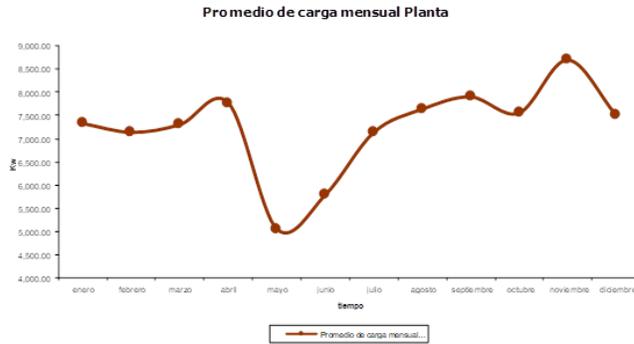
<sup>27</sup> MPNP = Mantenimiento correctivo no planificado

# Disponibilidad y fiabilidad de ciclos combinados de potencia en Guatemala utilizando la simulación de Montecarlo

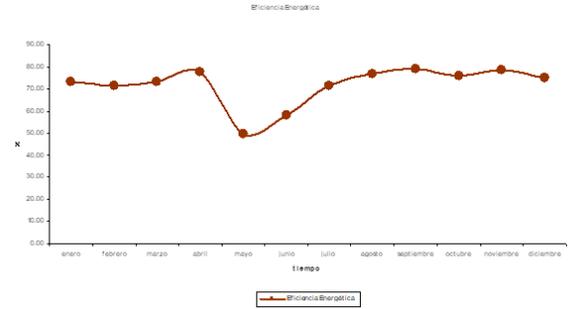
Fecha de recepción: 13 marzo 2024

Fecha de corrección: 5 abril 2024

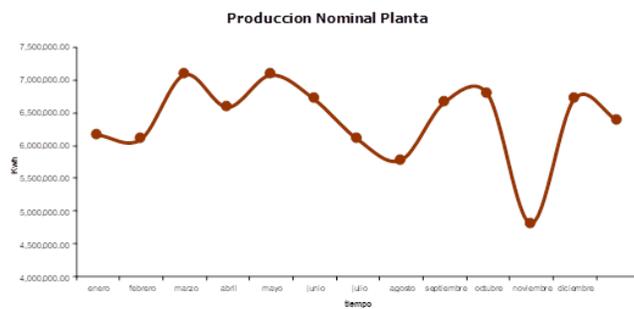
**Gráfico 17.** Promedio de Carga mensual Cristal por Método Montecarlo [Kw]



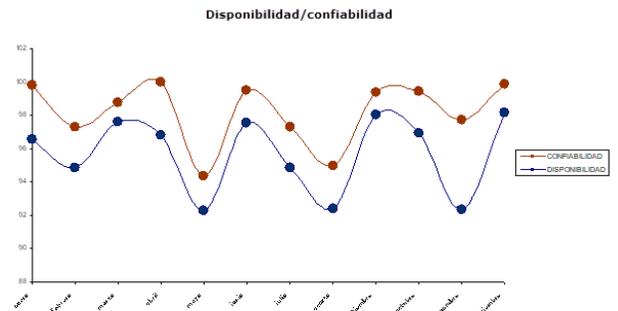
**Gráfico 19.** Eficiencia mensual Cristal por el Método de Montecarlo. [%]



**Gráfico 18.** Producción nominal mensual Cristal por Método Montecarlo. [Kwh]



**Gráfico 20.** Disponibilidad y confiabilidad Cristal por el Método de Montecarlo. [%]



# Disponibilidad y fiabilidad de ciclos combinados de potencia en Guatemala utilizando la simulación de Montecarlo

**Fecha de recepción: 13 marzo 2024**

**Fecha de corrección: 5 abril 2024**

## Generadora Centro America.

**Tabla 21.** Simulación utilizando en método de Montecarlo para la generación y consumo específico de la generadora Centro América (Santizo, Planta ciclo combinado centroamérica de 15 MW, 2008)

Período	Promedio de Consumo de HFO	Promedio de Consumo Especifico	Energía Generada Planta	Promedio de carga mensual Planta	Producción Nominal Planta <sup>28</sup>	Eficiencia Energética
Meses	$\frac{Kwh}{gal}$	$\frac{gal_{HFO}}{Kwh}$	<i>Kwh</i>	<i>Kw</i>	<i>Kwh</i>	%
Enero	1315.0	112.2	2264154.0	8349.2	4206343.6	53.83
Febrero	15.4	224.8	5296210.0	10672.2	7768860.2	68.17
Marzo	147.5	14989.7	1988307.0	9936.0	2996189.6	66.36
Abril	14.6	217.5	3419177.0	11353.6	4397683.5	77.75
Mayo	9.0	49942.4	4654968.0	10000.6	6815275.7	68.30
Junio	3785.4	1.1	4132964.0	8450.1	7052236.0	58.61
Julio	2377.1	1.1	3017316.0	41766.7	3359667.7	89.81
Agosto	177.2	73.0	1949740.0	4873.4	6326752.3	30.82
Septiembre	285.9	15.5	4064278.0	10721.6	5545403.7	73.29
Octubre	1818.2	5.9	4447670.0	8343.5	7671381.9	57.98
Noviembre	425.0	9.8	3786306.0	10739.0	5184408.4	73.03
Diciembre	2830.0	1.5	2445279.0	8036.9	4517627.5	54.13

**Tabla 22.** Simulación utilizando en método de Montecarlo para consumo de combustible para la Generadora Centro America.

Período	HFO	Diesel	Lubricantes
Meses	Consumo (gal)	Ingreso (gal)	Consumo (gal)
Enero	77218	160005	173
Febrero	306075	454600	0
Marzo	7849140	75700	206
Abril	198523	423400	572
Mayo	63636748	732246	353
Junio	186104	429600	250
Julio	586	531954	495
Agosto	9278	708329	927
septiembre	14948	507406	975
octubre	6304	488467	446
noviembre	9767	586928	621
diciembre	300	152900	508

**Tabla 23.** Simulación utilizando en método de Montecarlo para las Horas de operación para la generadora Centro America. (Santizo, Planta ciclo combinado centroamérica de 15 MW, 2008)

Período	Operación	Operación	Std-by	Std-by	MPP <sup>29</sup>	MMP	MCP <sup>30</sup>	MCP	MPNP <sup>31</sup>	MPNP
	h/mes	%	h/mes	%	h/mes	%	h/mes	%	h/mes	%
Enero	39%	470	63%	11	1%	1	0%	0	0%	39%
Febrero	76%	172	25%	0	0%	0	0%	1	0%	76%
Marzo	27.6%	511	68.7%	8	1.0%	3	0.3%	1	0.1%	27.6%
Abril	42%	388	54%	27	4%	7	1%	0	0%	42%
Mayo	62.7%	285	38.4%	0	0.0%	1	0.1%	2	0.3%	62.7%
Junio	67.1%	270	37.4%	0	0.0%	12	1.6%	1	0.1%	67.1%
Julio	28%	484	65%	24	3%	8	1%	1	0%	28%
Agosto	58%	294	40%	6	1%	21	3%	0	0%	58%
Septiembre	52.8%	366	50.8%	1	0.2%	1	0.1%	0	0.0%	52.8%
Octubre	70.6%	207	27.8%	2	0.3%	13	1.7%	2	0.2%	70.6%
Noviembre	49.3%	343	47.7%	7	1.0%	18	2.4%	1	0.1%	49.3%
Diciembre	41.59%	423	56.86%	0	0%	0	0%	0	0%	41.59%

**Tabla 24.** Disponibilidad y confiabilidad planta Centro América (Santizo, Planta ciclo combinado centroamérica de 15 MW, 2008)

Período	DISPONIBILIDAD	CONFIABILIDAD	UTILIZACIÓN
enero	98.00%	100.00%	37.39%
febrero	100.00%	100.00%	75.00%
marzo	99.00%	100.00%	28.00%
abril	95.31%	100.00%	41.68%
mayo	100.00%	100.00%	62.00%
junio	98.44%	99.93%	63.20%
julio	95.00%	100.00%	28.00%
agosto	96.0%	100.0%	57%
septiembre	100.00%	100.00%	51.00%
octubre	98.00%	100.00%	70.00%
noviembre	97.00%	100.00%	49.00%
diciembre	100.00%	100.00%	42.00%
enero	98.00%	100.00%	37.39%

<sup>28</sup> Es el equivalente a la producción continua de la planta.

<sup>29</sup> MPP = Mantenimiento preventivo planificado

<sup>30</sup> MCP = Mantenimiento correctivo planificado

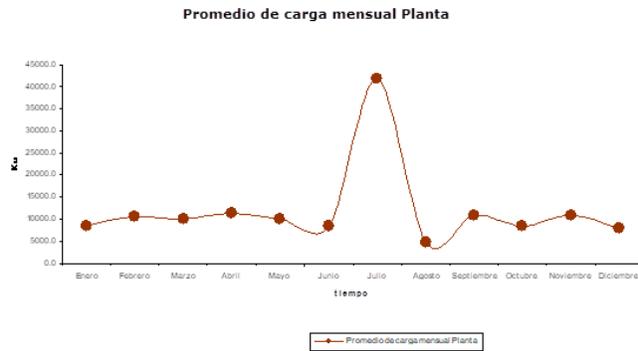
<sup>31</sup> MPNP = Mantenimiento correctivo no planificado

# Disponibilidad y fiabilidad de ciclos combinados de potencia en Guatemala utilizando la simulación de Montecarlo

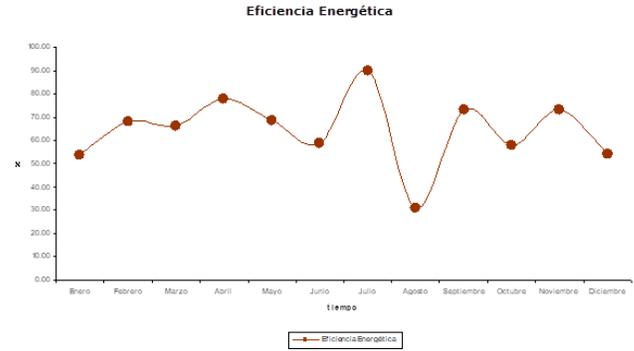
Fecha de recepción: 13 marzo 2024

Fecha de corrección: 5 abril 2024

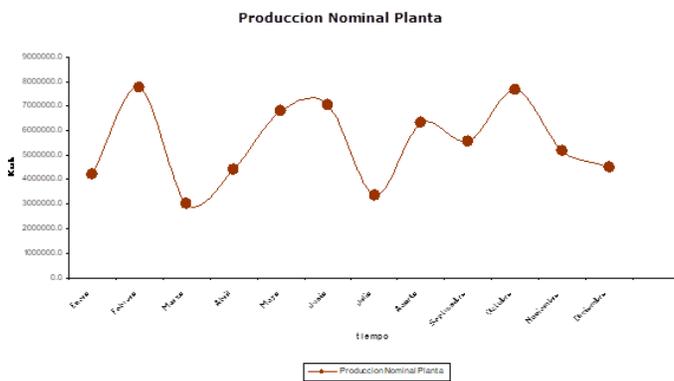
**Gráfico 21.** Promedio de Carga mensual Centro America por Método Montecarlo [Kw]



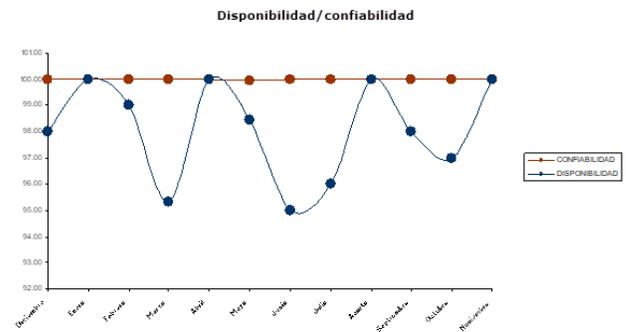
**Gráfico 23.** Eficiencia mensual Centro América por el Método de Montecarlo. [%]



**Gráfico 22.** Producción nominal mensual Cristal por Método Montecarlo. [Kwh]



**Gráfico 24.** Disponibilidad y confiabilidad Centro America por el Método de Montecarlo. [%]



## CONCLUSIONES

1. La evaluación de la confiabilidad es un estudio aplicado a los Sistemas Eléctricos de Potencia, que puede ayudar a la toma de decisiones sobre capacidad a instalar e inversiones para mejorar la calidad del servicio
2. En Guatemala se calcula en relación con las horas de operación y de mantenimiento y no respecto a la disponibilidad del combustible.
3. Los estudios de confiabilidad en los sistemas de potencia consisten en evaluar la habilidad del parque generador para satisfacer la demanda total del sistema
4. En esta investigación se utilizó la simulación Monte Carlo para evaluar la confiabilidad de dos plantas de ciclo combinado:
  - 4.1. Planta generadora Cristal, ubicada en Petén, Guatemala,

# Disponibilidad y fiabilidad de ciclos combinados de potencia en Guatemala utilizando la simulación de Montecarlo

**Fecha de recepción: 13 marzo 2024**

**Fecha de corrección: 5 abril 2024**

potencia de planta 10 MW combustible HFO (búnker) y LFO (diesel): Unidades Cristal 1 y cristal 2 de 5 MW cada una.

% Confiabilidad =

$$\frac{(\sum \text{horas operación} + \sum \text{horas standby})}{(\sum \text{horas operación} + \sum \text{horas standby} + \sum \text{horas mtto no planificado})}$$

4.2. Planta generadora Centroamericana, ubicada en ciudad Guatemala, potencia de planta 15 MW combustible HFO (búnker) y LFO (diesel): Unidades GCA 1 y GCA 2 de 7.5 MW cada una.

6. La confiabilidad siempre es mayor que la disponibilidad, debido a que la confiabilidad no toma en cuenta las horas por mantenimiento correctivo planificado y las horas por mantenimiento preventivo.

5. Se utilizó el concepto de disponibilidad y de confiabilidad que vienen representados por las siguientes ecuaciones de diseño:

7. La confiabilidad promedio del año 2007/2008 es 98.50% y la disponibilidad promedio en el mismo período es 99.5%

% Disponibilidad =

$$\frac{(\sum \text{horas operación} + \sum \text{horas standby})}{(\sum \text{horas operación} + \sum \text{horas standby} + \sum \text{horas mtto no planificado} + \sum \text{horas mtto correctivo planificado} + \sum \text{horas mtto preventivo})}$$

## APÉNDICE

### CALCULO DE MUESTRA POR LA SIMULACIÓN DE MONTECARLO

Se tomará como muestra los valores de la generadora Cristal enero 2008 generadora 1.

$$PG_{\max} = 94867.0$$

Segundo se determina la probabilidad de paro

$$s = \frac{\text{dias}}{\text{mes}} = \frac{1}{31} = 0.0322$$

Por motivos de nomenclatura se utiliza:

Se determina el mínimo de razón de horómetro.

- $\cdot A$  Valor aleatorio entre 0 y 1
- $\cdot A_{2}^5$  Valor aleatorio dentro de un rango.
- $\bar{A}$  Valor promedio

$$kh_{\min} = \frac{h_i}{PG_{i \min}} = \frac{24}{94867} = 0.00025299$$

Min mínimo de un grupo de datos.

Se determina el máximo de razón de horómetro.

Max máximo de un grupo de datos.

$$kh_{\max} = \frac{h_i}{PG_{i \max}} = \frac{17}{55578} = 0.000305876$$

El primer paso se determina el valor mínimo y máximo de PG

$$PG_{\min} = 55578.0$$

Se determina el mínimo de PG omitiendo los días de paro.

# Disponibilidad y fiabilidad de ciclos combinados de potencia en Guatemala utilizando la simulación de Montecarlo

**Fecha de recepción: 13 marzo 2024**

**Fecha de corrección: 5 abril 2024**

$$PG_{\min} = 55578$$

Se determina el máximo de PG.

$$PG_{\max} = 94867$$

Se determina el mínimo de Galones de HFO por potencia generada omitiendo los días de paro.

$$kG_{\min} = \frac{Gal_{HFO}}{PG_{i \min}} = \frac{20650}{88904} = 0.23227301$$

Se determina el máximo de Galones de HFO por potencia generada.

$$kG_{\max} = \frac{Gal_{HFO}}{PG_{i \max}} = \frac{13251}{55578} = 0.23842168$$

Se determinan los días de paro.

$$paro = si('s < s) \longrightarrow 0 = PG$$

Días sin paro

$$PG = \cdot PG \Big|_{PG_{\min}}^{PG_{\max}} = \cdot PG \Big|_{94867.0}^{55578.0} = 67057.0$$

El cual se obtiene mediante la función de Excel

"=ALEATORIO.ENTRE (Límite inferior, Límite superior)"

Se genera el valor de kh

$$kh = si \left( PG * kh \Big|_{kh_{\max}}^{kh_{\min}} < 24 \right) \longrightarrow 67057.0 * kh \Big|_{0.000305876}^{0.00025299} = 20.050043$$

Se genera el valor de kG

$$kG = PG * kG \Big|_{kG_{\max}}^{kG_{\min}} = 67057.0 * kG \Big|_{0.23842168}^{0.23227301} = 67.057$$

Generación de resultados para mes enero:

**Tabla 25** Calculo de muestra de la Generadora Cristal motor 1 mes enero (Santizo, Planta ciclo combinado Cristal 10 MW, 2008)

PG	Kh	kG
74715	21.144345	74.715
0	0	0
93644	24	93.644
68191	18.957098	68.191
73721	21.157927	73.721
0	0	0
76188	20.875512	76.188
81431	24	81.431
77647	19.644691	77.647
80602	21.440132	80.602
57772	15.771756	57.772
77717	22.771081	77.717
79990	22.87714	79.99
63821	16.848744	63.821
64385	18.92919	64.385
75587	19.65262	75.587
81294	22.274556	81.294
67105	18.185455	67.105
64807	17.692311	64.807
74093	21.857435	74.093
85501	23.769278	85.501
62724	18.691752	62.724
78112	21.949472	78.112
84583	22.245329	84.583
93286	24	93.286
73701	19.235961	73.701
65275	17.297875	65.275
61196	17.624448	61.196
80696	22.59488	80.696
77868	23.048928	77.868
86181	24	86.181

Los cuales se ingresan como si fueran las lecturas físicas reales de cada día. Este método se repite para cada motor de cada generadora y el informe utiliza los valores promedio de cada uno de los motores, pero la sumatoria de todos los consumos.

**Fecha de recepción: 13 marzo 2024**

**Fecha de corrección: 5 abril 2024**

### **Bibliografía**

- Barbu, A., & Chun Zuh, S. (2019). *Monte Carlo Methods*. Ohio: Springer.
- Belotserkouski, O., & Khlokov, I. (2010). *Monte Carlo Methods in Mechanics of Fluids and Gas*. EEUU: Editorial Word Scientific.
- Binder, K., & Heermann, D. (2010). *Monte Carlo Simulation in Statistical Physics*. London: Springer.
- Brooks, S., Gelman, A., Jones, G., & Li-Meng, X. (2011). *Handbook of Markov Chain Monte Carlo*. Boston: Chapman and Hall/CRC.
- Dimov, I. (2008). *Monte Carlo Methods for Applied Scientists*. Estados Unidos de América: Editorial Word Scientific.
- Gentle, Y. (2004). *Random Number Generation and Monte Carlo Methods*. New York: Springer.
- Hoffman, E. (1996). *Power Cycles and Energy Efficiency*. New York: Editorial Academic Press.
- Horlock, J. (2010). *Combined Power Plants*. EEUU, Florida: Editorial Krieger Publishing Company.
- Kreose, D., Taimre, T., & Botev, Z. (2011). *Handbook of Monte Carlo Methods*. Canadá: Wiley.
- Robert, C., & Casella, G. (2005). *Monte Carlo Statistical Methods* (2nd Edition ed.). New York: Springer; Edición.
- Rubinstein, R., & Kroese, D. (2016). *Simulation and the Monte Carlo Method* (Thirth Edition ed.). New York: Wiley.
- Santizo, M. (2008). *Planta ciclo combinado centroamérica de 15 MW*. Guatemala: Informe.
- Santizo, M. (2008). *Planta ciclo combinado Cristal 10 MW*. Guatemala: Informe.
- Shonkwiler, R., & Mendivil, F. (2009). *Explorations in Monte Carlo Methods*. London: Springer.
- Thomopoulos, N. (2012). *Essentials of Monte Carlo Simulation: Statistical Methods for Building Simulation Models*. Chicago, Illinois: Springer.