

## **Asignatura: Termodinámica Técnica II.**

### **Conferencia Especial**

#### **Conferencia N°10. “Ciclos de Potencia con Fuentes de Energía Renovable” .**

**Contenidos:** Potenciales termodinámicos de los ciclos de potencia eólico y solar. Rendimientos máximos. Parque eólicos. Centrales térmico solares. Sistemas híbridos.

#### **Bibliografía:**

Prácticas de energía renovable; curso internacional de Verano de la Universidad de Aachen, Alemania. (Webpage de FIQM, biblioteca online)  
“Calentador solar concentrador parabólico”; Roberto Vizcón y Omar Herrera; Rev. Ingeniería Energética; 1979; Cuba. (CDICT, UMCC)

#### **Objetivos:**

Conocer ejemplos de aplicación de ciclos productores de potencia a partir de fuentes renovables eólicas y solares, en el entorno territorial, nacional e internacional.

#### **Desarrollo:**

La producción de energía útil a partir de fuentes renovables es la principal tarea de la ingeniería térmica del siglo XXI que es la Época Post Petróleo.

En el año 2020 se debe generar un 25 % de la energía en el mundo por esta vía y Cuba debe alcanzarlo en el 2030.

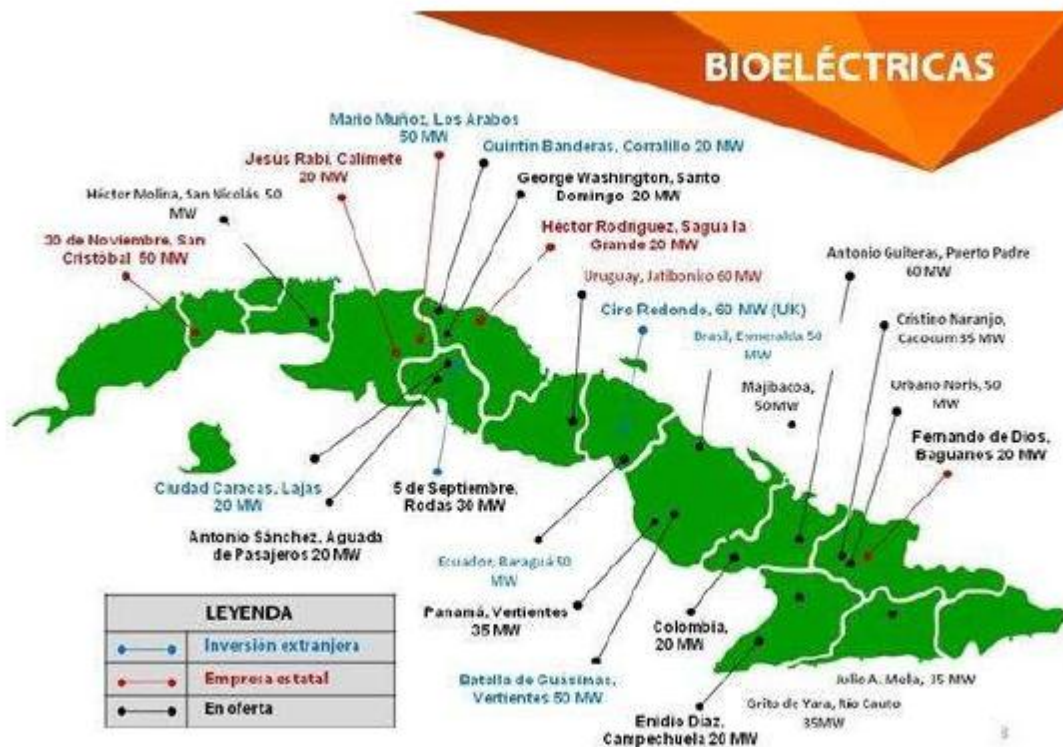
Las biomásas, los recursos: hídricos, eólicos, solares entre otros juegan en ello un importante rol.

#### Sistemas de biomásas:

En Cuba se utilizan biomásas con estos fines en la industria azucarera (bagazo de la caña de azúcar) que para una zafra puede aportar alrededor de 1 millón de toneladas de petróleo equivalente, lo que hace que Cuba sea uno de los países que tiene un elevado componente de ER aunque no en la producción de electricidad.

Se utilizan también en Cuba sistemas a partir de otros residuos de cosechas como son: el arroz, madera, residuos orgánicos y de excretas animales para generar biogás, etc.

Ver esquema siguiente de estas potencialidades (2017) en uso de biomasa en Cuba:



### Sistemas eólicos:

Los sistemas eólicos pueden producir trabajo o electricidad. En el primer caso están los molinos de viento. En Matanzas (2012) existían 258 de los cuales funcionan 199 de ellos.

En el segundo casos, los sistemas eólicos (aerogeneradores) pueden generar como máximo una potencia que viene dada por el límite de Betz, que se expresa como:

$$P_{teórica} = 1/2 * A * V^3 * \rho; \text{ Watts.}$$

$$P_{máx} = 0,59 * P_{teórica}; \text{ Watts.}$$

Donde:

A: es el área de flujo, m<sup>2</sup>

V: es la velocidad del viento, m/s

$\rho$ : es la densidad del aire, kg/m<sup>3</sup>

En realidad los aerogeneradores tienen el llamado coeficiente de utilización de la potencia que se calcula según:

$$C_p = P_{real} / P_{máx}$$

Este coeficiente de aprovechamiento de la potencia máxima ( $C_p$ ) toma valores entre 0.10 y hasta 0,80, según el tipo de sistema captador de la energía eólica.

Véase la siguiente tabla con estos potenciales termodinámicos:

Velocidad del viento $V_{Wind}$ [m/s] - [km/h]	Densidad de Potencia $Q_{Wind}$ [W/m <sup>2</sup> ]	Factor de Densidad de Potencia	
5 - 18	75	1	Comienzo de Utilización de la energía
7 - 25,2	206	2,74	
10 - 36	600	8	Media anual de lugares favorables en Alemania
15 - 54	2025	27	
20 - 72	4800	64	
25 - 90	9375	125	Máxima horaria
30 - 108	16200	216	
32 - 115,2	19661	262	Máxima cada 10 minutos (ráfaga pico)
35 - 126	25725	343	
40 - 144	38400	512	
45 - 162	54675	729	
48 - 172,8	66355	885	

En la actualidad se construyen aerogeneradores de hasta 3 MW de potencia con álabes de hasta 75 m de radio. Los mismos presentan un ruido aerodinámico que se trabaja por controlar.

Existen mundialmente parques eólicos de hasta 200 MW de potencia. En Cuba se han instalado en la costa norte de Holguín parques eólicos de hasta 8 MW, se proyecta en cooperación con China también la instalación de dos grandes parques eólicos (PE) de 50 MW cada uno. Se estudia la instalación de nuevos PE en la cordillera de la Ciudad de Matanzas con una potencia de hasta 10 MW.

Ver esquema siguiente de estas potencialidades (2017) en uso de energía eólica en Cuba:



En la próxima clase de laboratorio se evaluará el rendimiento real de un aerogenerador.

### Sistemas fotovoltaicos:

La producción de energía eléctrica a partir de paneles fotovoltaicos está difundiéndose en Cuba, ya se tiene instalado más de 1 MW de potencia en más de 2000 escuelas de zonas rurales lo que ha sido posible por un importante programa de desarrollo cultural de la Revolución cubana.

En Cuba se tiene instalaciones de PFV por de 50 MW ya en uso. En Matanzas están ubicados 21 sistemas de PFV y 680 calentadores solares de agua, estos últimos principalmente en el sistema hotelero turístico.

Los PFV tiene un rendimiento máximo que oscila entre 12 y 25 %, pero el potencial termodinámico está dado por el rendimiento de Carnot asociado a este ciclo de potencia.

Para calcular el Rendimiento de Carnot asociado a un PFV se toma que:

$$Q_{rad} = \sigma_{\text{Boltzmann}} (T_{\text{cielo}}/100)^4 - (T_{\text{pext}}/100)^4; \text{ W/m}^2$$

$\sigma_{\text{Boltzmann}}$  ;  $5,67 * \text{ W/m}^2\text{K}^4$  , Constante de Stefan – Boltzmann de la radiación

$T_{\text{cielo}}$  ; Es una temperatura aparente y máxima que depende de la captación solar.

$T_{\text{pext}}$  ; Es la temperatura exterior del PFV, la cual al incrementarse disminuye el rendimiento termodinámico del captador.

Entonces, el rendimiento de Carnot asociado al PFV como motor térmico funcionando entre dos fuentes térmicas será:

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1/T_{\text{pext}} - 1/T_{\text{cielo}}$$

Este rendimiento se debe comparar con el real del PFV, que se determina por la ecuación:

$$\eta_{\text{PFV}} = W_{\text{útil}}/Q_{\text{abs}} ; \text{ donde } Q_{\text{abs}} \text{ es igual que } Q_{\text{rad}}.$$

Debe cumplirse que  $\eta_{\text{Carnot}}$  sea mayor que  $\eta_{\text{PFV}}$ .

Ver información siguiente de estas potencialidades (2017) en uso de energía fotovoltaica en Cuba:

"Un ejemplo de esto es la fábrica de paneles fotovoltaicos y componentes electrónicos, Ernesto Che Guevara, ubicada en Pinar del Río, la cual trabaja desde hace tiempo en la producción de módulos fotovoltaicos para las viviendas donde no llegaba la electricidad. En ese periodo fuimos haciendo micro inversiones, y cuando se aprobó la política ya la fábrica tenía 38 mil paneles (9,5 megawatts) para los parques fotovoltaicos que se van a interconectar al sistema electroenergético nacional", agregó el directivo del MINDUS.

En el 2015/16 esta fábrica llega a su máxima capacidad con 6 mil unidades (15 megawatts), una meta que tiene para el 2017 también, cuenta Vicente de la O, y que por el momento marcha bien, y con las materias primas necesarias para hacer 60 mil unidades que corresponden a este año.

"De las inversiones que se están haciendo en la industria, se está teniendo en cuenta esta fábrica para ampliar de 15 a 65 megawatts. Eso sería saltar de 60 mil paneles a 260 mil paneles. Está todo el proceso terminado y se prevé que para finales del 2018 la inversión esté terminada y se pueda comenzar a producir ese volumen de energía", agregó O Levy.

Véase la comparación de los potenciales termodinámicos del viento y el sol se exponen a través de la siguiente tabla ejemplo:

### **Comparación entre la Densidad de Potencia del Viento y el Sol**

Si se compara la densidad de potencia del viento con la del sol, se puede determinar, que la máxima densidad de potencia del viento y la relación de la máxima con la mínima de la densidad de potencia en el viento, es mucho mayor. La energía anual del viento en lugares favorables llega a ser casi tres veces mayor. En la tabla, figura 2, se muestran los valores típicos para el viento y sol, en lugares favorables en Alemania.

El período de tiempo, en el que no hay disponibilidad de oferta de energía, es para el sol casi dos veces mayor.

Durante el año se muestra en ambas fuentes de energía un comportamiento estacional inverso, mientras que durante el día la máxima del viento ocurre tres horas más tarde.

Durante la noche el viento posee un menor potencial que durante el día, mientras que para el sol se sabe que durante la noche el potencial es nulo.

La diferencia de altura es sólo relevante en el viento.

La región más favorable con potencial eólico para Alemania es la costa del mar del norte, mientras que para el potencial solar son las regiones del sur de Alemania.

		<b>Sol</b>	<b>Viento</b>
Densidad de Potencia Máxima	W/m <sup>2</sup>	1000	66355
Densidad de Potencia: Media Anual	W/m <sup>2</sup>	125	206
Relación del Valor Máximo a la Media Anual		8	322
Energía Anual	kWh/m <sup>2</sup> a	1100	3000
Período de Tiempo con $GG \leq 75 \text{ W/m}^2$	h	6000	
Calmas con $v_w \leq 5 \text{ m/s}$ ( $\leq 75 \text{ W/m}^2$ )	h		2600
Durante el Año: Máxima		Verano	Invierno
Mínima		Invierno	Verano
Durante el día: Máxima		12 <sup>00</sup>	14 <sup>00</sup> – 16 <sup>00</sup>
Mínima		18 <sup>00</sup> – 6 <sup>00</sup>	24 <sup>00</sup>
Dependencia de la altura		Bajo	Fuerte
Regiones Favorables en Alemania		Sur	Costa

## APLICACIÓN EN LABORATORIO DE ENERGÍA RENOVABLE.

Ciclos de potencia a partir de la Energía Eólica (aerogeneradores) y solar (panel fotovoltaico o PFV)

Resumen de ecuaciones de cálculo a utilizar:

### Aerogenerador:

$$P_{\text{teórica}} = 1/2 \cdot A \cdot V^3 \cdot \rho; \text{ Watts.}$$

$$P_{\text{máx}} = 0,59 \cdot P_{\text{teórica}}; \text{ Watts.}$$

Donde:

A: es el área de flujo, m<sup>2</sup>

V: es la velocidad del viento, m/s

$\rho$ : es la densidad del aire, kg/m<sup>3</sup>

En realidad los aerogeneradores tienen el llamado coeficiente de utilización de la potencia que se calcula según:

$$C_p = P_{\text{real}} / P_{\text{máx}}$$

Este coeficiente de aprovechamiento de la potencia máxima ( $C_p$ ) toma valores entre 0.10 y hasta 0.80, según el tipo de sistema captador de la energía eólica.

### **Panel Fotovoltaico:**

Para calcular el Rendimiento de Carnot asociado a un PFV se toma que:

$$Q_{\text{rad}} = \sigma_{\text{Boltzman}} * (T_{\text{cielo}}/100)^4 - (T_{\text{pext}}/100)^4; \text{ W/m}^2$$

$\sigma_{\text{Boltzman}}$  ;  $5.67 * \text{ W/m}^2\text{K}^4$  , Constante de Stefan – Boltzmann de la radiación

$T_{\text{cielo}}$  ; Es una temperatura aparente y máxima que depende de la captación solar.

$T_{\text{pext}}$  ; Es la temperatura exterior del PFV, la cual al incrementarse disminuye el rendimiento termodinámico del captador.

Entonces, el rendimiento de Carnot asociado al PFV como motor térmico funcionando entre dos fuentes térmicas será:

$$N_{\text{Carnot}} = 1 - T_{\text{pext}}/T_{\text{cielo}}$$

Este rendimiento se debe comparar con el real del PFV, que se determina por la ecuación:

$$N_{\text{PFV}} = W_{\text{útil}}/Q_{\text{abs}} ; \text{ donde } Q_{\text{abs}} \text{ es igual que } Q_{\text{rad}}.$$

Debe cumplirse que  $N_{\text{Carnot}}$  sea mayor que  $N_{\text{PFV}}$ .