

CAPITULO 3: DESCRIPCIÓN DEL USO DEL PROGRAMA HEEP

3.1 MODELO ECONÓMICO DE LA PLANTA NUCLEAR

Dentro del programa HEEP se toman en cuenta algunos factores para la simulación del modelo económico en una planta nuclear, estos valores deben de ser introducidos en el programa, sin embargo, se debe de tener un entendimiento de lo que hace el programa internamente para poder interpretar los resultados y dar valores realistas.

Básicamente los parámetros que se le deben de brindar al programa son: Capital de inversión, costos durante la operación y costo de desmantelamiento. Los costos de operación se subdividen O&M y costo de consumibles, que a su vez este último se subdivide en costo de combustible (front end), costo de combustible (back end) y costo de otros consumibles.

A continuación se presentan las definiciones [1] de estos conceptos, esto con el fin de comprender el tipo de valores que deben de ser introducidos en el programa:

- *Costo de inversión de capital:* Es la suma de todos los gastos incurridos en el diseño, licenciamiento, fabricación y erección, construcción y la comisión de la planta. El costo de capital que excluye el Interés Durante la Construcción (IDC) se llama “costo de la noche a la mañana”.
- *Gastos de combustible:* Consiste principalmente de dos costos, que son el front-end y back-end.

Front-end: Este proceso del ciclo el combustible nuclear, incluye los costos de la exploración, minado y molienda del uranio, conversión y enriquecimiento, hasta la fabricación de los elementos de combustible. Se incluyen también los costos de transporte y envío al reactor. Si se utiliza también combustible reprocesado, los costos de la conversión a combustible útil también se consideran.

Back-end: Este proceso puede ser tanto reprocesamiento como disposición directa del combustible gastado. Para el reprocesamiento se incluyen todos los gastos del almacenamiento y transporte de combustible irradiado y reprocesamiento por la extracción de plutonio y uranio, y la separación, concentración y disposición final de los desperdicios radiactivos. Los costos de disposición directa consisten de la transportación y almacenamiento del combustible gastado, encapsulación final y disposición de éste.

- *Costos de operación y mantenimiento (O&M):* Son todos los costos que se generan por el pago de salarios, materiales para mantenimiento y servicios de mantenimiento.
- *Costos de restauración:* Son los costos generados por la renovación del reactor.
- *Costos de consumibles:* Son los costos generados por materiales especiales como el agua pesada, que no se incluyen en O&M.
- *Costos de desmantelamiento:* Son los costos generados por el desmantelamiento de la planta y las facilidades asociadas a ello.

Para el caso de la planta nuclear, el costo nivelado se puede obtener de la siguiente manera, asumiendo que en cierto periodo se cuenta con cierta cantidad de dinero P con un interés i, la cantidad de dinero acumulada será para ese periodo:

$$F = P + Pi \quad (3.1)$$

$$F = P(1 + i) \quad (3.2)$$

Para el siguiente periodo se tendría la acumulación del primer periodo, es decir:

$$F_1 = F + Fi = F(1 + i) \quad (3.3)$$

$$\therefore F_1 = P(1 + i)(1 + i) = P(1 + i)^2 \quad (3.4)$$

Resultando con esto que para n periodos se tendrá:

$$F_n = P(1 + i)^n \quad (3.5)$$

Donde el factor $(1 + i)^n$ se denomina factor de cantidad compuesta de pago único (FCCPU) se hace referencia a este factor como F/P, y es el factor que produce una cantidad futura F de una inversión inicial P después de n períodos, a la tasa de interés i [2]. Despejando P obtenemos lo siguiente:

$$P = \frac{F_n}{(1+i)^n} \quad (3.6)$$

Con esto se pueden calcular las cantidades futuras de cada rubro de la planta y con esto se obtiene la fórmula que utiliza HEEP para calcular el costo nivelado unitario de energía [3].

$$P = \sum_{t_0}^{t_n} \frac{CI_t}{(1+r)^{t-t_0}} + \sum_{t_0}^{t_n} \frac{O\&M_t}{(1+r)^{t-t_0}} + \sum_{t_0}^{t_n} \frac{F_t}{(1+r)^{t-t_0}} + \sum_{t_0}^{t_n} \frac{RF_t}{(1+r)^{t-t_0}} + \sum_{t_0}^{t_n} \frac{CN_t}{(1+r)^{t-t_0}} + \sum_{t_0}^{t_n} \frac{DC_t}{(1+r)^{t-t_0}} \quad (3.7)$$

CI_t = Costos de inversión capital en el tiempo t.

$O\&M_t$ = Costos de operación y mantenimiento.

F_t = Combustible (front y back end).

RF_t = Costos de renovación de la planta.

CN_t = consumibles.

DC_t = Desmantelado de la planta.

t_0 = Es el año base que se toma para hacer la comparación.

r= Tasa de descuento.

Como subproducto de la planta nuclear se tendría electricidad, aunque claro que el programa HEEP da la opción de que la planta nuclear genere electricidad o no, y este dedicada solamente a las necesidades de energía de la planta de generación de hidrógeno. En caso de que se genere electricidad, se tendría la siguiente fórmula para calcular el valor presente de las ganancias que se obtengan por generar electricidad.

$$VP_{gan}[\$] = C \left[\frac{\$}{KWh} \right] \sum_{t_0}^{t_i} \frac{P_{total}[KW] * 8760[h] * F.P.}{(1+r)^{t-t_0}} \quad (3.8)$$

P_{total} = Potencia eléctrica del sistema al año t

8760 = Número de horas en un año

F.P. = Factor de planta

Aquí C es el costo nivelado por KWh generado, el cual HEEP calcula automáticamente. Cabe mencionar que el costo nivelado es una relación que existe entre el costo total de inversión y la producción de electricidad generada [\$/KWh] esto durante toda la vida útil de la planta. Para el caso de producción de hidrógeno, tendríamos un costo nivelado expresado en [\$/kg].

3.2 MODELO ECONÓMICO DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

El programa HEEP calcula los costos del hidrógeno generado por consumo de energía proveniente de la planta nuclear. También existe la opción de considerar la planta de hidrógeno funcionando independientemente. En el caso de que la planta nuclear intervenga el costo de la energía de ésta se toma en cuenta para el cálculo de los costos de planta de producción de hidrógeno.

El programa HEEP utiliza la siguiente fórmula para calcular el costo nivelado de la producción de hidrógeno [4].

$$CNP_H = \frac{E_{NPP}(t_0) + E_{PGH}(t_0)[\$] + E_{TH}(t_0)[\$]}{G_{H_2}(t_0) [Kg]} \left[\frac{\$}{Kg} \right] \quad (3.9)$$

$E_{NPP}(t_0)$: Es el valor presente de los gastos incurridos en la planta nuclear en el año t_0 .

$E_{PGH}(t_0)$: Es el valor presente de los costos incurridos en la planta de generación de hidrógeno y su almacenamiento (inversión capital, operación y mantenimiento, consumibles, renovaciones y desmantelamiento).

$E_{TH}(t_0)$: Gastos del transporte de hidrógeno.

$G_{H_2}(t_0)$: Hidrógeno total generado a lo largo del ciclo de vida en un equivalente de valor presente en Kg.

3.3 METODOLOGÍA

El programa HEEP utiliza un método de análisis de valor presente, para calcular el costo nivelado de la producción de hidrógeno, donde se toma una tasa de descuento sin inflación.

Todos los costos deben de estar expresados en un precio constante basado en un año de referencia, si se quiere estimar el costo del hidrógeno para un año en particular (a futuro), entonces los costos se deben de escalar para ese año, utilizando la tasa de inflación adecuada. Lo resulta muy útil si se desean hacer proyecciones a futuro de diversos tipos de plantas con diferentes métodos de producción de hidrógeno.

El costo de las tres instalaciones (Planta nuclear, planta de hidrógeno, método de transporte) incluye el costo de construcción con el IDC (Interés Durante la Construcción), remodelación, O&M, desmantelamiento y el costo del combustible para el caso de la planta nuclear.

Dentro de HEPP se utiliza el índice de equidad/deuda para la construcción de las plantas, este índice nos dice la proporción en la que el capital fue invertido para la construcción de las plantas, la equidad representa la parte del capital proveniente de los inversionistas y la deuda aquella parte que proviene de fuera, por ejemplo, un préstamo bancario. Si el cociente de esa relación es menor a uno quiere decir que el proyecto está siendo financiado en mayor parte por deuda.

Para el propósito de este trabajo se utilizara un índice de equidad/deuda de 0/100. El costo de construcción para las plantas se eleva al índice de equidad/deuda, el costo de construcción, el cual ocurre antes de la operación de la planta, se evalúan. La parte de equidad se carga a la vida útil de operación de la planta y la parte de deuda, incluido el IDC, se cobra durante un periodo especificado a una tasa de descuento especificada.

Los costos que corresponde a O&M, ciclo del combustible, remodelación y desmantelamiento, son llevados al valor presente a la tasa de descuento deseada. Después el cociente entre el valor presente de los gastos y el valor presente del hidrógeno producido durante el tiempo de vida del reactor, nos da el costo nivelado del hidrógeno [Dls/Kg].

Para el caso de la metodología que utiliza HEPP, en específico para la planta nuclear, como el software considera “partir” el costo capital de inversión en equidad y deuda, dado el índice equidad/deuda. Por consiguiente tenemos que para el caso del reactor, su costo capital total de inversión se evalúa como la suma del costo “overnight” y el IDC. Donde el IDC se calcula para la tasa de interés de préstamo del mercado. Para el IDC también existen dos opciones. La primera opción es que el IDC se considere como parte de la deuda, la otra opción es que no se considere como parte de la deuda. La primera opción es más real, puesto que el interés forma parte de la construcción. La recuperación debida a la porción de equidad se distribuye durante todo el tiempo de vida del reactor y la porción de la deuda se distribuye sobre el periodo de retorno de la deuda a la tasa de descuento.

Otro aspecto que se debe de tomar en cuenta es que la planta nuclear, puede hacer las siguientes funciones:

- Producir electricidad y energía térmica.
- Producir únicamente energía térmica.
- Producir electricidad únicamente.

Para los casos que se harán en el capítulo 4, se considerarán la primera y segunda opción únicamente.

Otros parámetros importantes que son necesarios para la planta nuclear y de producción de hidrógeno son los siguientes:

Factor de disponibilidad: Es la relación que existe entre las horas disponibles y las horas totales de un periodo en consideración.

Factor de capacidad: Es la relación de la carga promedio de una unidad por un periodo de tiempo determinado y la potencia del equipo, se calcula como [5]:

$$F. C = \frac{\text{Demanda media}}{\text{Demanda máxima}} * 100 \quad (3.10)$$

El programa HEEP tiene una interfaz agradable y de fácil manejo, a continuación se describen las principales pantallas del programa para la adquisición de datos.

En la Fig. 3.1 se muestra la pantalla de selección de las distintas partes del programa HEEP, siendo éstas los detalles técnicos, periodo de tiempo y detalle de los costos. Todo esto para cada una de las 3 partes principales (planta nuclear, planta de generación de hidrógeno y método de transporte) de la producción de hidrógeno.

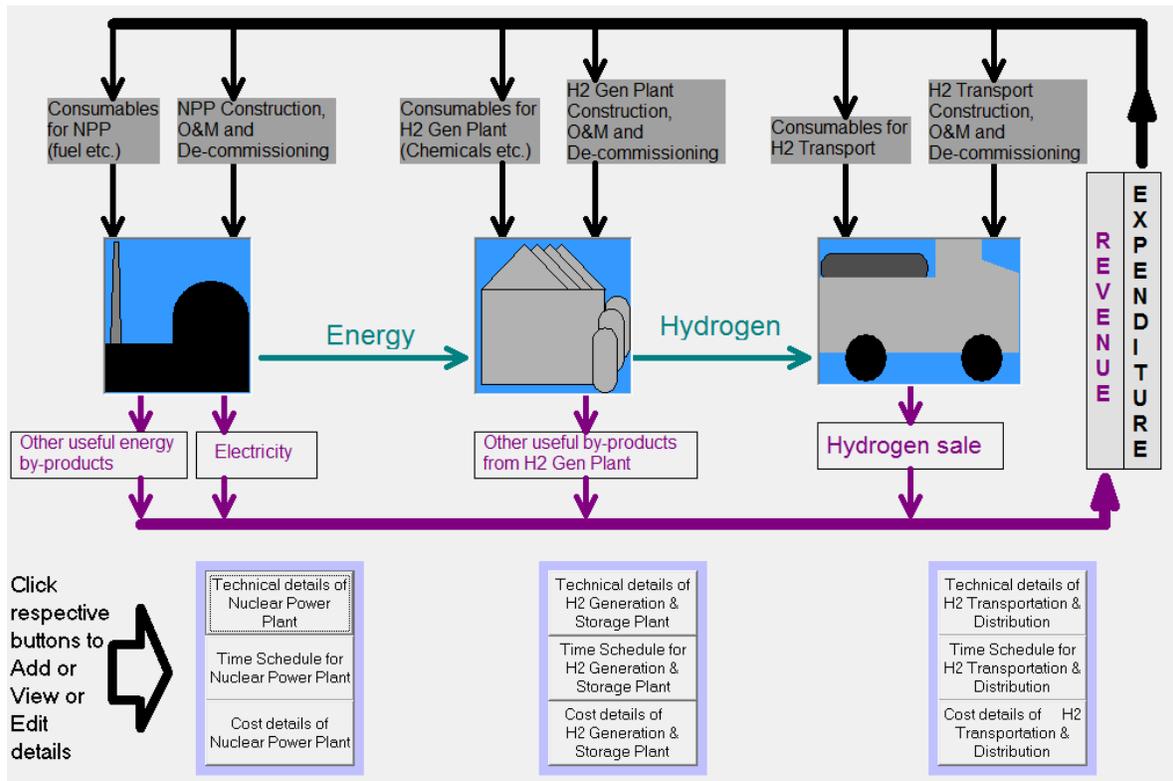


Fig. 3.1 Pantalla de selección del programa HEEP.

En la Fig. 3.2 se ven todos los detalles técnicos que necesitan cada una de las partes de todo el proceso de producción de hidrógeno. Para el caso de la planta nuclear, sería el número de reactores, su capacidad, factor de disponibilidad, factor de capacidad, etc. Para el caso de la planta de producción de hidrógeno sería, la eficiencia del proceso, energía térmica requerida,

electricidad de proceso requerida, etc. Por último para la etapa de transporte puede ser en vehículo o por gasoductos. Para el estudio que se lleva a cabo en presente trabajo, la etapa de transporte se mantiene sin cambio alguno, manteniendo los valores por default que trae el programa HEEP.

Aunque un detalle que se debe de mencionar es la regulación del transporte del hidrógeno, y los parámetros para hacerlo de la forma más segura posible, debido a las distintas zonas por la cual se transporte el hidrógeno y el tipo de transporte que se utilice [6].

The screenshot displays the HEEP software interface with three main panels:

- Nuclear Power Plant Details:**
 - Reactor Type: GT-MHR
 - Reactor Class: GT-MHR
 - Number of nuclear power generating units in plant: 4
 - Applications of Nuclear power:
 - Hydrogen generation
 - Electricity
 - Technical Parameters of NPP:

Parameter Description	Value
Rated Thermal Power (MWth/unit)	600
Capacity factor (%)	90
Availability factor (%)	100
Thermal Power for H2 gen. (MWth/unit)	540
- H2 Generation and Storage Plant Details:**
 - Location of H2 Generation Plant:
 - Co-located
 - Away from NPP
 - Number of hydrogen generating units in plant: 1
 - Parameter Description and Value table:

Parameter Description	Value
Rated annual hydrogen generation (kg/unit)	216000000
Efficiency of H2 generation process (%)	45
Unit capacity factor (%)	90
Unit availability factor (%)	100
Maximum process thermal energy required (MWth/unit)	1945
Maximum process electricity required (MWe/unit)	0.5
Maximum non-process electricity required (MWe/unit)	815
Maximum annual hydrogen generation (kg/unit)	194400000
 - H2 storage details:
 - H2 Storage Method:
 - Compressed Gas
 - Liquefactor
 - Metal Hydrides
 - Use in-built formulation for storage parameters
 - User to specify storage parameters
 - Parameter Description and Value table:

Parameter Description	Value
H2 Storage period (Hrs)	0
H2 compression pr. (MPa)	0
H2 Storage capacity (kg)	0
H2 compressor power (kWe)	0
Cooling water for compressor (Lit/hr)	0
- H2 Transportation Details:**
 - Type of H2 Transportation:
 - Transport by Vehicle
 - Pipe line Transportation
 - Details of pipeline transportation:
 - Use in-built formulation to calculate pipe line transportation parameters
 - User to provide pipe line transportation parameters
 - Parameter Description and Value table:

Parameter Description	Value
Transport distance (km)	500
Equivalent diameter of Pipe (m)	0.25
Friction factor	0.01
Temperature of H2 (K)	290
Delivery Pressure (MPa)	5
Inlet pressure (MPa)	39.15
Compressor Power (kWe)	59275.76

At the bottom, there are three buttons: "Store Technical Details of NPP", "Store Technical Details of H2GP", and "Store Technical Details of H2T". A navigation bar at the very bottom includes "Proceed to next step (Add / View / Edit time schedules)" and three informational messages:

- Technical details of hydrogen generation plant cannot be edited. These details are shown for information
- Technical details of hydrogen transportation cannot be edited. These details are shown for information

Fig. 3.2 Detalles técnicos de la planta nuclear, la planta de hidrógeno y el método de transporte.

La Fig. 3.3 nos muestra la línea de tiempo para cada una de las partes del programa HEEP, en esta parte se introducen los años correspondientes al inicio de construcción, inicio de operación, desmantelamiento de la planta, cierre de sitio, etc. Esta parte es igual para cada uno de los rubros que contempla HEEP.

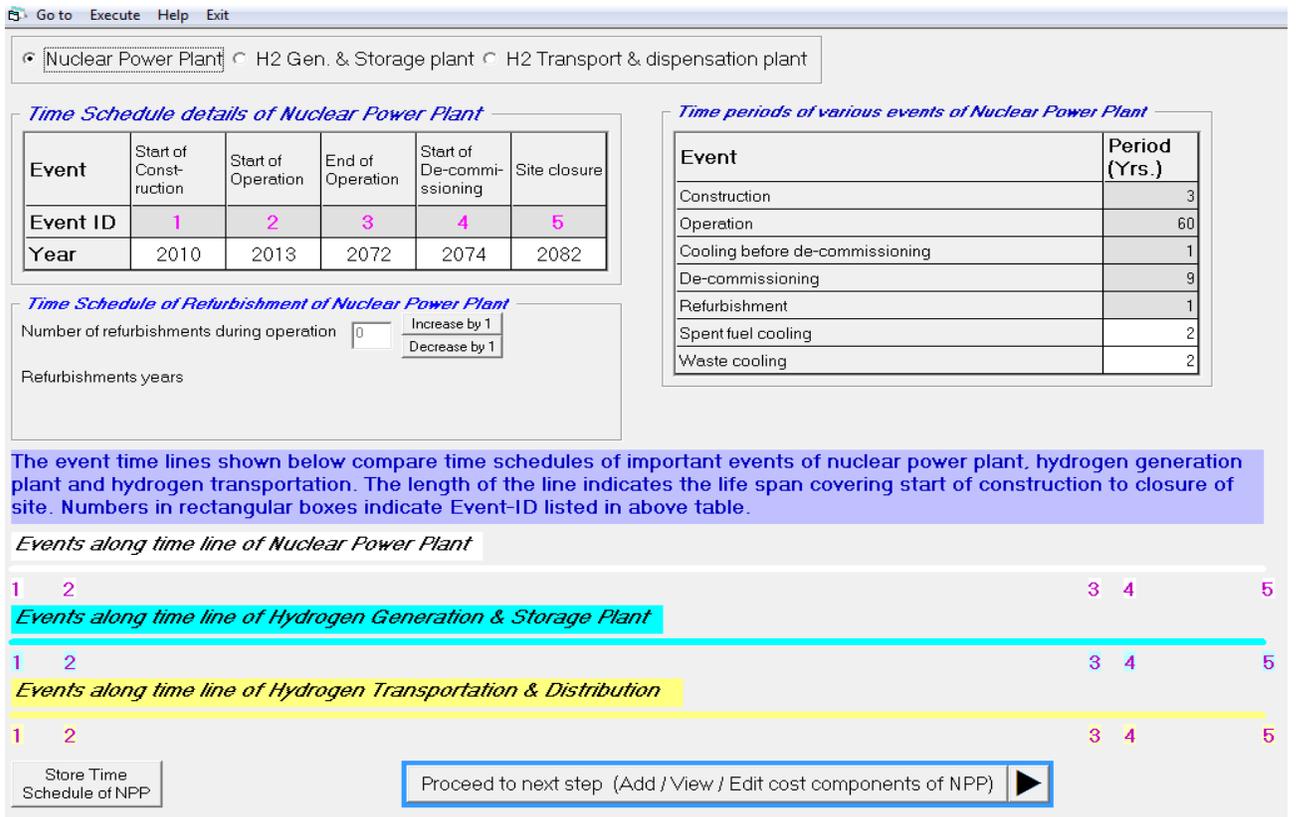


Fig. 3.3 Línea de tiempo de cada uno de los rubros.

La Fig. 3.4 muestra la interfaz donde se meten todos los datos económicos referentes a cada una de las partes que componen la producción de hidrógeno. Para el caso de la planta nuclear aquí se introduce los costos de “Front-end” y “Back-end”, pero en general son los mismos parámetros que se introducen para las 3 partes.

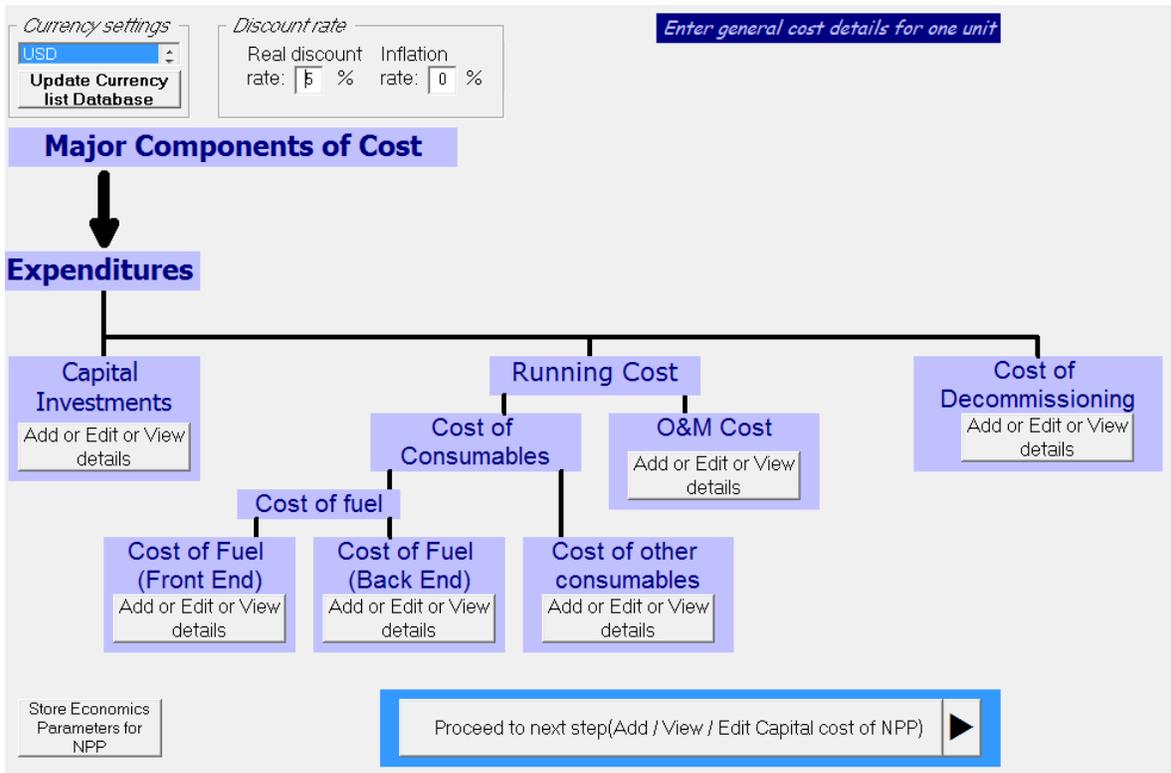


Fig. 3.4 Detalle de los costos para la planta nuclear, planta de hidrógeno y método de transporte.