

## **CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.**

México se encuentra en un lugar privilegiado por sus altos niveles de radiación solar y es por ello que es necesario el desarrollo de tecnologías probadas que utilicen el recurso solar como fuente de energía alterna a los combustibles fósiles para el abastecimiento de energía eléctrica a precios competitivos y de igual forma disminuir la tasa de emisión de gases de efecto invernadero los cuales son causantes del calentamiento global.

En el presente trabajo se analizaron los parámetros económicos que nos dan como resultado la viabilidad económica de una planta solar termoeléctrica en configuración de torre central instalada en la República Mexicana, tomando en cuenta las ventajas y desventajas de usar o no el almacenamiento térmico.

Una vez que se decidió el tema a tratar para esta tesis, se presentaron varios panoramas con respecto al tipo de central que se decidió analizar, ya que se encontró que existen diversas configuraciones de plantas solares termoeléctricas, por tal motivo fue necesario realizar una investigación sobre cuáles eran las características de cada tipo, para poder decidir sobre cuál configuración se buscaría información para este proyecto, siendo la correspondiente a plantas solares termoeléctricas de torre central con almacenamiento de energía las que más llamaron nuestra atención.

Una de las razones por las cuales se optó por analizar una planta de generación de energía eléctrica del tipo solar termoeléctrica con almacenamiento térmico fue debido a las características que nos presenta nuestro país, de tal manera que se buscó la mejor opción de utilizar las características de insolación del norte de México y se encontró que este tipo de planta es una excelente opción para el norte de nuestro país por sus altos índices de radiación solar durante todo el año. Se decidió que tuviera almacenamiento térmico para aprovechar un mayor lapso de tiempo la radiación solar captada, y debido al clima de la zona, que nos brinda calor durante el día y durante la noche la temperatura disminuye en demasía. Esta característica tan peculiar de la zona nos beneficia, pues durante el día utilizamos una parte de la radiación solar para generación directa, mientras que la otra parte la destinamos al almacenamiento térmico, y una vez que el nivel de radiación solar disminuye con el día, entra en funcionamiento el almacenaje de calor, y debido a la diferencia de temperaturas entre el almacenaje y el ambiente, la eficiencia se vería

beneficiada por la diferencias de temperaturas entre una fuente caliente y una más fría descrita por la ley de Carnot.

Este tipo de configuración es de las más desarrolladas en todo el mundo, por lo que encontrar información al respecto fue de fácil acceso. Inclusive se encontró un análisis detallado de una planta solar termoeléctrica de torre central con almacenamiento de energía desarrollada por *SolarPaces* que se utilizó como punto de inicio para realizar el análisis de una planta adecuada para las condiciones de nuestro país.

De igual forma se encontró que las características de nuestro país en cuanto a los índices de radiación solar son bastantes competitivas para buscar la implementación de una planta solar termoeléctrica de torre central con almacenamiento de energía, así que la idea del proyecto para nuestro país resultó bastante optimista en un principio, debido a esta situación característica de nuestro país.

Una vez que se tuvo bien claro el tipo de proyecto a analizar, se procedió a realizar un modelo matemático que permitiera realizar el análisis económico del proyecto. Dicho modelo brindó la posibilidad de obtener los indicadores económicos de interés para obtener la viabilidad el proyecto, como lo son el Beneficio/Costo y la Tasa Interna de Retorno.

El modelo también permitió modificar los costos de los elementos presentes en la implementación del proyecto, para realizar un mejor análisis del comportamiento de nuestro proyecto si es que se presentaba un cambio en algún valor económico, y cómo repercutiría esta modificación al proyecto.

Tomando en cuenta todos los aspectos antes mencionados, el modelo matemático utilizado fue desarrollado en *Excel* y estuvo basado en el reporte de *SolarPaces* de un proyecto para una planta solar termoeléctrica de torre central con almacenamiento de energía de 200 MW. Se utilizaron los mismos elementos de análisis económico empleados por *SolarPaces*, con los cambios propios de las características de nuestro país en cuanto a los índices de radiación solar, así como el referente al precio del terreno.

Así pues, nos dimos a la tarea de comenzar los cálculos pertinentes para la implementación del proyecto, basados como ya se mencionó en el reporte encontrado de *SolarPaces*, y una vez que se tuvo el caso base terminado, reafirmamos con los resultados obtenidos nuestras previsiones sobre la viabilidad de un proyecto implementado para nuestro país.

De los resultados del caso base se encontraron las características fundamentales que deben considerarse para implementar un proyecto con la configuración de planta solar termoeléctrica de torre central con almacenamiento de energía para nuestro país, y lograr

que los indicadores económicos B/C y TIR resulten favorables, es decir, que hagan este proyecto redituable.

Dentro de los costos propios del proyecto, se tiene el referente al terreno donde se planea la construcción, y para nuestro proyecto base en Hermosillo, Sonora, se encontró un terreno con las características exactas de superficie que se requerían para la planta propuesta, además de que el precio que se pedía por dicho terreno fue bastante bajo, por lo que el indicador unitario del terreno para el análisis económico estuvo a favor nuestro, ya que dicho precio por metro cuadrado estuvo por debajo del que presentaba el reporte de *SolarPaces* para el mismo rubro.

Esta situación del costo del terreno jugó un papel primordial en el análisis económico, pues disminuyó los costos de inversión y trajo por consiguiente un aumento del B/C y de la TIR. Por tal razón debemos comentar que para la implementación de un proyecto de este tipo debemos buscar un terreno con el menor costo posible, para con ello disminuir los costos de inversión.

Como se mencionó, una vez realizado el ejercicio de simulación económica del proyecto, se confirmó lo que se esperaba, que nuestro proyecto fuera redituable, pues los indicadores de B/C y la TIR así lo demostraron, situación que nos llevó a experimentar sobre otros escenarios que pudieran resultar igualmente redituables, pero con características diferentes a las presentadas en el caso base.

De las propuestas pensadas se encontró con la implementación de la planta en el mismo lugar, con las mismas características, pero con el cambio de no contar con almacenamiento térmico. Después de realizar los estudios económicos pertinentes, los resultados mostraron que implementar una planta solar termoeléctrica de torre central sin almacenamiento de ninguna manera resultaría viable, claro está, instalada bajo las características de radiación solar del sitio elegido para el caso base que es Hermosillo, así como la potencia instalada que se propuso.

Nuevamente se pensó en cuál sería el comportamiento de una planta solar termoeléctrica con almacenamiento térmico, pero instalada en un lugar distinto a Hermosillo con menor índice de radiación solar, y se decidió que se optaría por un lugar con menor índice, para ver qué tanto afectaría en cuanto a la viabilidad del proyecto esta disminución del índice de radiación solar.

Con estas atenuantes, se decidió que una forma de compensar el hecho de que se tendría menor captación de radiación solar, y por consiguiente menor potencia térmica, sería disminuir la potencia instalada. Una vez hecha esta adecuación en los cálculos de nuestro

análisis económico, se observó que aún en un lugar con menor radiación solar, un proyecto como el propuesto resultaba redituable, así lo reflejaban los indicadores de B/C y la TIR. Sin embargo, dichos indicadores estuvieron por debajo de los que arrojó nuestro caso base.

Finalmente, se propuso un último escenario en el cual se optó por regresar a la potencia instalada propuesta inicialmente en el caso base, pero conservando a Oaxaca como el lugar con menor radiación solar. Con ello, resultó que nuestro proyecto se encontraba en un nivel de inviabilidad, pues debido a la menor captación de radiación solar, no se lograba que los indicadores de B/C y la TIR resultaran favorables.

Después de analizar el caso, y buscar alternativas que hicieran que los indicadores cambiaran a nuestro favor, se pensó en que la forma más adecuada es aumentar el número de helióstatos para equiparar la captación de la radiación solar a la de nuestro caso base. Por consiguiente, al aumentar el número de helióstatos, se requiere de una mayor área de terreno donde colocar el excedente.

Así pues, realizadas las adecuaciones del incremento en helióstatos y terreno y altura de torre, se procedió a repetir el análisis económico, resultando que los indicadores de B/C y la TIR cambiaron a nuestro favor, convirtiendo el proyecto en redituable, pero aún por debajo del caso base.

Después de tener los resultados de los diferentes escenarios, se encontró que el mejor de todos es el caso base, pues con el costo de la inversión del proyecto es el que mayor índice de B/C y TIR obtuvo, por lo que se convierte en la opción más viable, tomando en cuenta que para los otros dos casos con características similares al base en cuanto al hecho de contar con almacenamiento térmico, la inversión aumenta y el índice B/C y TIR son menores en comparación al base, aunque son viables si se analizan fuera de la comparación con el caso base.

Para el escenario de montar una planta sin almacenamiento, nos encontramos que con las características del país referentes al nivel de radiación solar, resulta perjudicial en términos monetarios, pues no ofrece un nivel de B/C y TIR favorable. Eliminando los costos de los componentes que intervienen en el almacenamiento térmico, se encontró que se tiene que aumentar el precio de la tarifa para hacer redituable el proyecto, sin embargo el precio al que se tendría que recurrir sería muy alto en comparación con las tarifas de venta, y perderíamos competitividad frente a los competidores.

Disminuir la potencia instalada se podría pensar como una mejor opción ante la problemática que nos presenta este tipo de implementación (sin almacenamiento térmico), sin embargo al realizar esta disminución el monto de inversión medido como US\$/KW aumenta con lo que

baja la rentabilidad. Por todo esto, el caso de planta solar termoeléctrica sin almacenamiento térmico no es funcional para nuestro país.

De acuerdo a los indicadores económicos, se puede decir que las características propuestas para nuestro proyecto resultan suficientemente favorables para asegurar el éxito de su implementación, pues los resultados nos demuestran que en un lugar con los índices de radiación solar que presenta Hermosillo, la potencia instalada propuesta de 200 MW, aunado al almacenamiento térmico, se puede pensar en una planta de generación eléctrica competitiva, pues los costos de inversión se ven cubiertos con los costos de venta que se estima cobrar.

Ya que se toca el tema de los costos de venta de la electricidad producida, comencemos por comentar las formas que se consideraron para seleccionar cuál sería el precio que se emplearía. Como se mencionó en el capítulo anterior, se realizó un estudio de las cuotas que se cobran en diferentes partes del mundo para la venta de electricidad generada en plantas solares termoeléctricas de torre central con almacenamiento de energía, esto con la finalidad de tener una idea de las tarifas que existen, para una vez concluido nuestro análisis económico, comparar nuestra planta sería competitiva en cuanto a las tarifas encontradas.

De igual manera se optó por buscar información sobre las tarifas que tiene la Comisión Federal de Electricidad (CFE), información que se utilizó para complementar las tarifas que ya se tenían de las diferentes plantas del mundo. La información de CFE nos ayudó también para poder situar a nuestro proyecto en un nicho que nos resultará benéfico económicamente, pues se utilizaron las tablas de demanda que existen para venta de electricidad en el país, y en las cuales según el horario de utilización se consideran como de baja, base y alta demanda. Para cada uno de estos rangos se cuenta con una tarifa diferente, y la que más cara resulta es la que se encuentra en el horario de alta demanda.

Tomando los resultados que nos arrojó nuestro modelo matemático, incluyendo la información de las tarifas de las plantas a nivel mundial y también las tarifas que cobra CFE, se optó por elegir la tarifa de diez centavos de dólar por kWh, ya que este valor se encuentra ubicado en un rango intermedio de las tarifas utilizadas por las plantas mundiales, y en lo referente a la CFE, esta tarifa comprende un valor menor al que cobra en la demanda alta.

Utilizando nuestro modelo matemático, se varió la tarifa que se propuso inicialmente, y se encontró que se puede disminuir su nivel hasta a ocho centavos de dólar por kWh, sin perder la viabilidad de nuestro proyecto, es decir, aún con la tarifa disminuida en dos centavos los indicadores de B/C y TIR se mantienen a nuestro favor.

Con esta tarifa aumentaríamos nuestra competitividad, pues nos acercaríamos a las tarifas que tiene CFE en sus horarios de baja demanda y demanda base. Así pues, para fines de venta estaríamos en la posibilidad de contar con dos tarifas diferentes según el horario en que se demande la energía eléctrica.

Basados en las tablas de horarios de demanda de CFE, se encontró un panorama muy favorable para nuestro proyecto, ya que las horas de funcionamiento contempladas en el proyecto con almacenamiento térmico se acoplan perfectamente a los horarios de demanda pico que tienen las tarifas más caras.

Se propone como una forma de aumentar el factor de planta de un proyecto de planta solar termoeléctrica con almacenamiento térmico, sería recurrir al sistema híbrido con una planta de ciclo combinado, aunque cabe mencionar que el objetivo de la tesis no abarca un análisis económico de este tipo de configuración, por lo que esto sería un nuevo tema de investigación.

El sistema híbrido entregaría mayor seguridad de obtener niveles de energía esperados, pues cuando dependemos de la radiación solar no tenemos la certeza de que sea constante, es decir son suposiciones muy cercanas pero nunca seguras, y al entrar en funcionamiento con el sistema híbrido se lograría compensar e incluso superar los niveles que se deseen.

La operación del sistema híbrido sería a base de gas natural, y entraría en funcionamiento una vez que el almacenamiento térmico se agote, o a la par del mismo, dependiendo del nivel con que se cuente de almacenamiento y/o los requerimientos de energía que se tengan.

Así mismo, con una implementación híbrida obtendríamos mayor número de horas de generación, pudiendo emplear el gas natural tanto antes como después de la utilización de energía solar y su correspondiente almacenamiento térmico.

Sin embargo, como un punto económico en contra, se presentan los costos que representa la compra del gas natural, pues su precio está en constante modificación. Por esta razón se deben estudiar a fondo los requerimientos de la zona en donde se desee utilizar un sistema híbrido y solamente pensar en ella como una opción siempre y cuando se compensen los gastos de su utilización con respecto a la generación que se obtenga.

Con todo lo anterior, se nos presenta una opción más, sin embargo, y como se hizo notar, la implementación de un sistema híbrido aún representa una opción que debe estar sujeta a características muy especiales y no a un método probado de planta solar termoeléctrica.

Las tecnologías de centrales solares termoeléctricas en configuración de torre central se encuentran en la actualidad lo suficientemente maduras para su implementación de tipo comercial en los rangos de 10 a 200 MW, sin embargo, aún falta clarificar su situación legislativa para que con ello se establezca un marco estable a la ayuda de financiamientos y con la introducción de sistemas híbridos en sus primeras fases facilitará aun más su introducción en el mercado.

Una vez puesta en marcha su construcción a nivel comercial en el mundo, la reducción de costos de inversión estará asegurada debido a la fabricación masiva de sus componentes y que éstos a su vez en el futuro serán de una fácil fabricación.

