

ANTONIO SEGURA - IGNACIO MARTÍNEZ - FRANCISCO LÓPEZ

VENTAJAS DE UNA MODELIZACIÓN DETALLADA DEL BOP EN LOS ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE UN AUMENTO DE POTENCIA: APLICACIÓN A C.N. COFRENTES

INTRODUCCIÓN

La Central Nuclear de Cofrentes es una central General Electric con un reactor de agua en ebullición de 6ª generación y una contención de tipo MARK 3. Originalmente Cofrentes fue diseñada con un margen de un 5% de caudal de vapor con respecto a los valores originales de diseño. Usando este margen de diseño, durante los años 1987-1988, IBERDROLA, conjuntamente con General Electric y Empresarios Agrupados, estudió la viabilidad de la operación de la central a una potencia térmica de 3015 MWt, es decir, a un nivel de potencia de un 104,2%. Actualmente Cofrentes tiene licenciada una potencia de operación del 102% (2952 MWt) y en evaluación por el C.S.N. los estudios para aumentar la potencia hasta el 104,2%.

La experiencia recabada en el funcionamiento de otras plantas similares parece indicar que actualmente aún existen márgenes en el diseño del reactor y componentes asociados de la isla nuclear suficientes para garantizar un funcionamiento en condiciones óptimas de la central hasta niveles de potencia de un 115%, aproximadamente unos 3328 MWt.

Adicionalmente, aparte de los componentes asociados a la isla nuclear, es preciso evaluar los equipos convencionales, necesarios para obtener el consiguiente aumento de la potencia eléctrica en bornes del generador. Aunque, en principio, cualquier equipo utilizado para la conversión del vapor en energía puede ser sustituido por otro de mayor capacidad, el volumen de las modificaciones y su coste puede hacer que un determinado nivel de aumento de potencia no sea atractivo dada su rentabilidad. Por tanto, la propuesta final de aumento de potencia en una central nuclear deberá considerar

ambos aspectos: en primer lugar las limitaciones técnicas impuestas por los márgenes existentes en el diseño; en segundo lugar, la rentabilidad de la inversión que hay que realizar para alcanzar la potencia máxima compatible con una operación segura.

Desde el punto de vista operativo, el proceso general que conlleva un Programa de Aumento de Potencia consta de tres fases: Análisis de Viabilidad, Estudio Detallado e Implantación.

Análisis de Viabilidad

Su objetivo es valorar las necesidades técnicas requeridas para el aumento de potencia, así como las implicaciones que éstas tienen desde el punto de vista de costes.

En general, este estudio tiene un alcance muy limitado para aumentos de potencia hasta el 105%, ya que, como se dijo anteriormente, la concepción original de la planta fue diseñada con estos márgenes de diseño. Por el contrario, para extensiones de potencia por encima del 105%, el estudio de viabilidad cobra una importancia relevante.

El análisis suele realizarse para varios escalones de aumento de potencia, desde la potencia actual hasta ajustar la potencia objetivo. Los resultados obtenidos para cada escalón del análisis quedan recogidos en un documento justificativo de la viabilidad técnica y económica de operar a la potencia en cuestión.

En general, un estudio de viabilidad típico aborda tres áreas de la planta:

- Evaluación de componentes de la Isla Nuclear: estos estudios evalúan el impacto del aumento de potencia sobre el combustible y la neutrónica, el sistema de suministro de vapor nuclear, la contención, la instrumen-

tación, el análisis de seguridad del reactor y el término fuente. En C.N. Cofrentes, para el Análisis de Viabilidad del 115%, estos estudios han sido llevados a cabo conjuntamente por General Electric y ENUSA.

- Evaluación del Balance de Planta (BOP): se aplica aquí la metodología apropiada para evaluar qué componentes del ciclo térmico de la planta son capaces y cuáles no de funcionar, con los adecuados márgenes, para cada nivel de potencia. En C.N. Cofrentes, para el Análisis de Viabilidad del 115%, este estudio está siendo desarrollado conjuntamente por IBERDROLA Ingeniería y Consultoría y General Electric, y se analizará con más detalle en los apartados subsiguientes.

- Evaluación del turbo grupo, a fin de evaluar las modificaciones necesarias asociadas con distintos niveles de incremento de potencia

Estudio Detallado

Una vez se obtiene la aprobación del Análisis de Viabilidad, y decidida ya la mejor opción de Aumento de Potencia, comienzan los análisis detallados para preparar la documentación que constituirá el soporte de licencia, y que permitirá obtener la autorización ministerial de funcionamiento a la potencia extendida.

Los estudios de detalle para justificar el funcionamiento seguro de la planta a potencia extendida se realizan siguiendo una metodología específica que, en la medida de lo posible, es recomendable que este previamente aceptada por el organismo regulador. Este es el camino seguido por General Electric, que ha desarrollado una metodología para el análisis del aumento de potencia en centrales BWR, tanto para aumentos hasta el 105%, como para potencias

extendidas más allá del 105 %. La metodología ha sido presentada a la NRC, que ha aprobado los Informes de Licencia (LTR) preparados por General Electric para aumentos de potencia hasta el 105%, y ha emitido el documento de comentarios del staff a la metodología para aumentos hasta el 120%. El Informe de Evaluación de Seguridad (SER) se espera para finales de 1997.

Implantación

Tras el Estudio de Detalle, y antes de la implantación de las modificaciones requeridas, se realizan las siguientes actividades:

- Elaboración de las especificaciones de los equipos nuevos o modificados.
- Desarrollo de la ingeniería de las modificaciones de Planta, puntos de tarado, adecuación de sistemas y propuestas de modificación de Especificaciones Técnicas.
- Solicitud al CSN del Aumento de Potencia.
- Solicitud al MINER

Por último, se aborda la implantación de las modificaciones requeridas para el Aumento de Potencia.

En el presente artículo no se pretende cubrir el análisis detallado de un estudio de aumento de potencia, ya que esto requeriría una extensión excesivamente amplia. Se ha preferido centrar el alcance en los estudios de viabilidad y, en particular dentro de esta fase, en los estudios en los que participa directamente Iberdrola Ingeniería y Consultoría. En concreto, se analizará, dentro del Análisis de Viabilidad, la problemática asociada con la evaluación del Balance de Planta (BOP), área esta que, como ya se apuntó anteriormente, constituye la mayor fuente de retos técnicos para el Aumento de Potencia.

DESARROLLO DE UN MODELO DE PLANTA PARA EL AUMENTO DE POTENCIA

La necesidad de realizar un estudio detallado del comportamiento de los componentes principales del Balance de Planta (BOP) en el estudio de viabilidad proviene de la experiencia de aumentos de potencia en otras centrales nucleares, principalmente en Estados Unidos, que han resultado en modificaciones significativas en las turbinas de alta y baja presión, en el generador y sus sistemas auxiliares, en el circuito de condensado y agua de alimentación, calentadores, sistema de refrigeración del condensador, bombas y torres de refrigeración, separadores de humedad y recalentadores, filtros desmineralizadores, válvulas de control de flujo etc., con un impacto económico significativo en el programa de aumento de potencia. Por el contrario, las modificaciones en los sistemas de suministro de vapor nuclear (NSSS) y de seguridad (ECSS) como consecuencia de los estudios de aumento de potencia suelen ser mínimas.

De lo anterior se deduce la necesidad de realizar una evaluación lo más detallada posible en el estudio de viabilidad de las capacidades de cada equipo y sistema que componen el BOP de la planta, de forma que sea posible conocer a priori si se van a exceder o no sus márgenes de diseño al nivel de potencia deseado.

Para la evaluación del margen de capacidad de cada componente ante el aumento de potencia, General Electric cuenta con un programa informático denominado *Integrated Plant Modeler* (en adelante IPM) que soporta el actual BOP de Cofrentes, en el que se consideran todas las características técnicas y modificaciones que se han ido introduciendo en los componentes del BOP a lo largo de la vida de la central, como por ejemplo el cambio de relleño de las torres, cambio de calentadores, modificaciones en los MSR's, filtros desmineralizadores, etc. El objetivo es el desarrollo de un modelo que se acerque lo más posible a la configuración actual y real de la planta, huyendo, en la medida de lo posible, de los balances originales de diseño, para permitir realizar simulaciones del comportamiento esperado de la central a diferentes potencias.

Adicionalmente, el programa es lo suficientemente preciso, didáctico y flexible para permitir su implantación en el proceso de seguimiento de los parámetros de operación que realiza C.N. Cofrentes.

Modelo de C.N. Cofrentes. Características diferenciales

Como ya se ha dicho anteriormente, para la realización de un incremento de potencia más allá del 105%, la metodología usada por General Electric requiere disponer de una herramienta de análisis y simulación que permita:

- Extrapolar el comportamiento de los sistemas de la central con el Aumento de Potencia.
- Confirmar que los sistemas de la central tie-

nen márgenes de diseño adecuados.

- Estudiar posibles alternativas.
- Cuantificar de forma precisa las inversiones requeridas para conseguir la potencia objetivo.

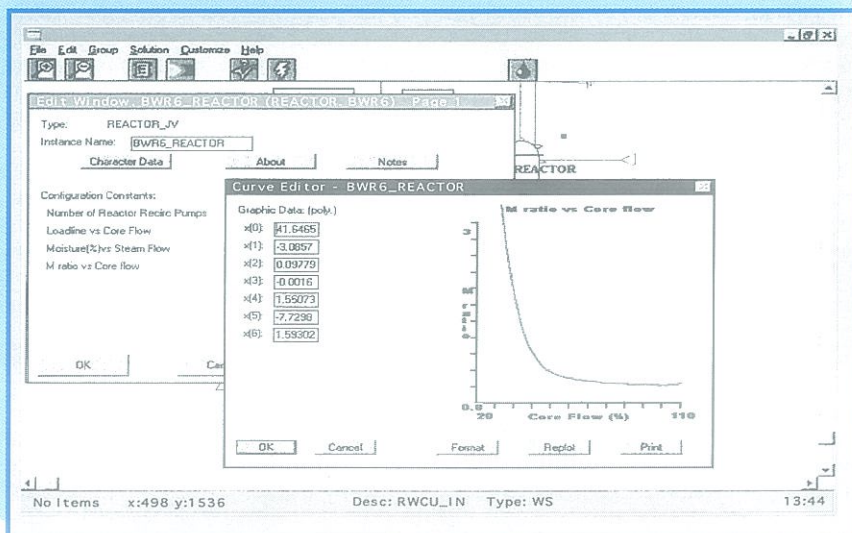
Para ello, el modelo debe reunir unas ciertas características, de las cuales cabe destacar, por ser menos habituales en otros programas similares, las siguientes:

- Un modelo detallado de la caldera nuclear que supone la integración de la termohidráulica y neutrónica del reactor en el balance térmico de la planta. En efecto, el modelo del reactor incluye como novedad con respecto a otros códigos la curva de potencia del reactor para los distintos caudales, las curvas de variación del caudal de recirculación en función de la potencia térmica y del caudal del núcleo así como la posibilidad de introducir en el cálculo la variación de la humedad del vapor principal en función del caudal de agua del reactor, además de las curvas características de pérdida de carga en recirculación y vapor principal. Todo lo anterior conforma un amplio abanico de posibilidades para la realización de cálculos de sensibilidad en la operación del reactor y su impacto en el ciclo térmico de la central, de una forma rápida y flexible, sin la necesidad de modificar ningún parámetro característico del reactor.

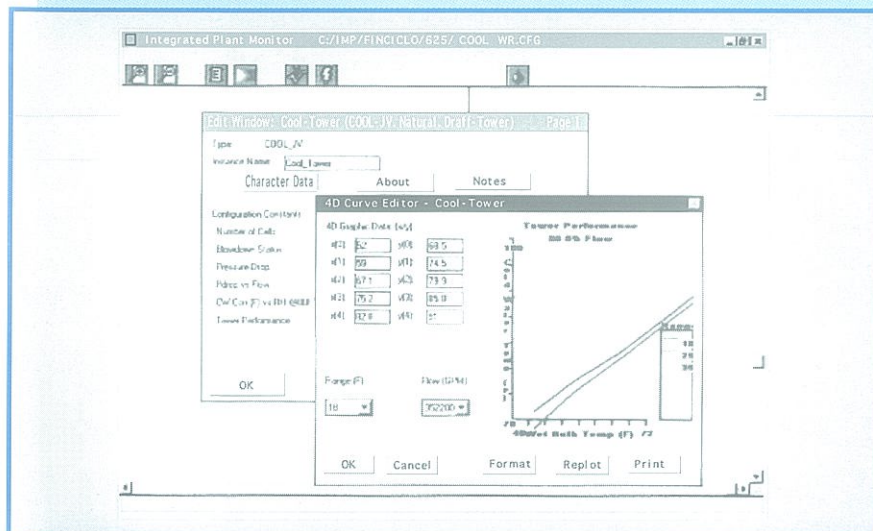
- Un modelo detallado de las turbinas de alta y baja presión, configuradas para sus curvas de diseño, utilizado para evaluar la capacidad de paso de vapor, los rendimientos de las etapas de la turbina, etc., y que permite la interconexión de este modelo con el resto de los equipos del ciclo sin tener que hacer aproximaciones mediante curvas simplificadas que modelicen el comportamiento de las extracciones o sin conexión entre las turbinas de alta y baja presión.

- Un modelo detallado de las torres de

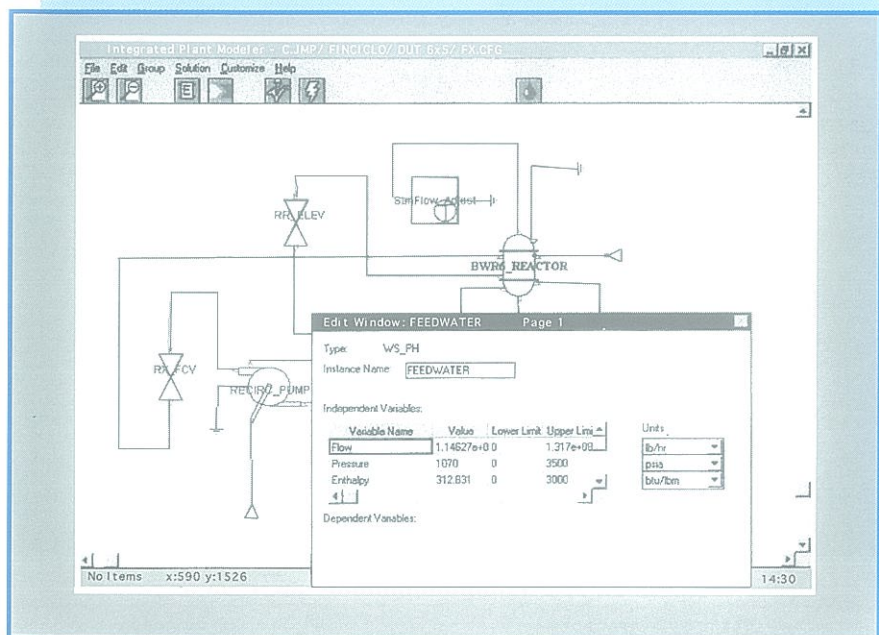
F1 - Pantalla de IPM con la variación del factor *M* de recirculación en función del caudal del Núcleo. Esta curva es específica del reactor de C.N. Cofrentes



F II- Mapa de operación de las torres de refrigeración. Se representa en la gráfica tres rangos para un caudal de 352900 Gpm, pudiéndose variar fácilmente el caudal o los rangos por el usuario



F III- Representación del subsistema del reactor. La ficha que se representa da las condiciones del agua de alimentación al reactor. Para obtenerla basta pinchar con el ratón en la línea de agua de alimentación. Este subsistema se integra modularmente con los restantes del BOP, obteniéndose así configuración completa de la planta



refrigeración, incluyendo el mapa de operación de las torres en función de la temperatura de bulbo húmedo del aire para distintos caudales de agua de circulación y rangos de temperaturas. De nuevo se abre un campo enorme de aplicación para estudios de sensibilidad que cubran todas las condiciones atmosféricas posibles en el área de la planta, pudiéndose establecer fácilmente la condición limitativa desde un punto de vista meteorológico.

- Un modelo detallado del condensador, en el que como novedad más importante se incluye su definición en función del material de construcción, diámetro de los tubos y método estándar de cálculo del intercambio térmico de cara a su dimensionado y calibración, pudiendo ser bien explícitamente, a través del

método del coeficiente de intercambio, o bien usando el método de cálculo recomendado por el Heat Exchanger Institute

- Asimismo, se incluyen modelos detallados de los equipos eléctricos de la planta, con sus curvas características de eficiencia y factor de potencia, lo que permite evaluar fácilmente las intensidades y potencia necesarias para cada equipo en el caso de un determinado aumento de potencia, y de esta forma evaluar la capacidad de los distintos equipos eléctricos. De la misma forma, se incluyen modelizaciones de las curvas de diseño de caudal, altura y rendimiento de las bombas de agua de alimentación, recirculación, condensado, refuerzo de condensado y circulación. De lo anterior se puede concluir la considera-

ble potencia que tiene el modelo para la realización de análisis multi-paramétricos de forma sencilla e intuitiva. Esto es de gran importancia para el estudio de configuraciones de la planta diferentes a la de operación normal, que pueden ser limitativos desde el punto de vista de la capacidad de los diferentes equipos que componen el ciclo, ya que la experiencia indica que si bien la mayoría de las veces la capacidad de un equipo o sistema suele ser suficiente para hacer frente a un determinado incremento de potencia en régimen estable, la condición limitativa del equipo suele ser los distintos transitorios asociados al nuevo nivel de potencia.

En el caso de CN Cofrentes, una vez concluida la modelización de la planta, se han introducido en el modelo los datos actuales de operación con objeto de proceder a la validación del mismo, trabajo que se está realizando conjuntamente por Iberdrola y General Electric. El proceso de validación deberá concluir en una calibración del modelo que permita el análisis del comportamiento de los distintos equipos del Balance de Planta para los distintos incrementos de potencia que se deseen estudiar, tanto en regímenes de operación normal como en regímenes de operación especiales, como por ejemplo el enfriamiento final de temperatura de agua de alimentación. Asimismo, el modelo reúne la flexibilidad adecuada para permitir el estudio del efecto de distintos transitorios a diferentes niveles de potencia, con el fin de garantizar que se cumplen los márgenes de diseño adecuados, lo que suministrará los datos deseados en cuanto a sobre dimensionamiento o necesidad de sustitución de equipos.

Características técnicas del modelo IPM.

El IPM permite al usuario ensamblar un modelo cualquiera de planta a partir de unos bloques predeterminados que modelizan los distintos equipos de la planta. Un equipo podría ser, por ejemplo, una bomba, una turbina o cualquier otro componente de planta. Los distintos equipos se conectan entre sí con corrientes, configurando ambos, equipos y corrientes, un sistema que define el modelo de la planta. Una vez configurada la planta, el usuario selecciona un conjunto de condiciones de contorno y parámetros ajustables para usar en el proceso de solución. De esta forma, cualquier parámetro de entrada que define un equipo o corriente puede ser identificado como un parámetro variable durante el proceso de solución o incógnita, o como un punto de funcionamiento del equipo que determina una incógnita. El modelo está desarrollado en lenguaje C++, reuniendo una serie de ventajas técnicas muy importantes que facilitan su uso:

- Interfase Windows que permite ver en cualquier momento la configuración actual de la planta
- Flexibilidad de uso en cuanto a facilidad de cambios de configuración de la planta
- Potencia y rapidez de cálculo

OTROS FACTORES A TENER EN CUENTA EN EL AUMENTO DE POTENCIA

La experiencia de C.N. Cofrentes indica que un programa de aumento de potencia se facilita extraordinariamente si se adoptan previsiones durante la operación y mantenimiento de la planta que integren las distintas modificaciones que se introducen en la misma. Estas previsiones deben abarcar las diferentes pruebas y sustituciones y modificación de equipos existentes

Pruebas

En un programa de aumento de potencia es importante confirmar las predicciones que se realizan con los modelos analíticos, mediante pruebas de los sistemas y de los componentes. Algunas de las pruebas son preceptivas durante el arranque posterior a la obtención del permiso de operación a la potencia extendida. En cualquier caso, es interesante poder aprovechar las pruebas que se realizan después de las modificaciones o sustituciones de equipos importantes, para verificar su comportamiento y realizar extrapolaciones a la potencia objetivo. Este es el caso de CN. Cofrentes cuando ha procedido a la sustitución de algún calentador, tras la modificación de las torres de refrigeración y como está previsto realizar después de la modificación en los separadores de humedad y recalentadores y en el condensador principal.

Sustituciones y Modificaciones de equipos

Durante la operación de las centrales, y por diferentes motivos, suele ser necesario la modificación o sustitución de equipos importantes. Llegado este momento es importante tener una orientación clara hacia el futuro aumento de potencia de la instalación, de modo que, cuando menos, al finalizar la modificación o sustitución el componente, quede evaluada la capacidad de éste para un previsible aumento de potencia. En C.N. Cofrentes, desde que se dispone de los estudios de aumento de potencia al 105%, (año 1990), las modificaciones que se han realizado en equipos significativos de la central se han especificado con la condición de operación del 110% y con márgenes adicionales para un posible aumento hasta el 115%.

CONCLUSIONES

Las centrales nucleares BWR han sido diseñadas para unos caudales de vapor superiores al nominal, permitiendo aumentos de potencia en torno al 5% prácticamente sin modificaciones significativas y cumpliendo con los márgenes de seguridad requeridos en el diseño. En los estudios de aumento de potencia, y en especial cuando se trata de potencias extendidas más allá del 105%, es conveniente realizar

un Análisis de Viabilidad previo para fijar la potencia objetivo y la rentabilidad del aumento de potencia, identificando las áreas críticas de la central que necesitan un estudio más detallado, y que se realizará en una fase posterior. Este análisis permite identificar limitaciones significativas de la planta que podrían penalizar el coste asociado con el aumento de potencia.

Para potencias superiores al 105 % no es suficiente con comprobar la capacidad de los sistemas de la isla nuclear para suministrar en condiciones seguras el vapor requerido por el turbogruppo para producir un aumento equivalente de la potencia eléctrica. Se requiere disponer de una herramienta de análisis y simulación que permita extrapolar el comportamiento de los sistemas de la central, así como confirmar que los sistemas de la misma tienen márgenes de diseño adecuados, o estudiar posibles alternativas y cuantificar de forma precisa las inversiones requeridas para conseguir la potencia objetivo.

Durante 1997, C.N. Cofrentes tiene previsto finalizar el Análisis de Viabilidad para extender la potencia de la central más allá del 105%. Los estudios previos sobre comportamiento de los sistemas de la isla nuclear y del turbogruppo se están realizando para el 110 y 115% de potencia. Igualmente está previsto finalizar el análisis para el resto de sistemas del Balance de Planta dentro del estudio de viabilidad y para el rango de potencias indicado.



Antonio SEGURA ROCHE es Licenciado en Química-Física por la Universidad Complutense, 1982. Master en Ingeniería Nuclear, CIEMAT, 1983. Master en Ingeniería Software por la UPM, 1991. Inició sus actividades profesionales en INITEC en 1984. En 1985 ingresa en UITE-SA donde trabaja en las áreas de Seguridad Nuclear, Fiabilidad y Mantenibilidad, con especial dedicación en diversos proyectos de APS. Entre 1990 y 1993 dirige el Departamento de Aplicaciones Informáticas e Inteligencia Artificial de UITE-SA. En 1997 se integra en el Departamento de Generación Nuclear de Iberdrola Ingeniería y Consultoría, donde actualmente presta sus servicios.



Francisco LÓPEZ GARCÍA es Ingeniero Industrial por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros del ICAI y master en administración y dirección de empresas de ICADE. Desde 1983 ha desarrollado actividades de ingeniería de apoyo a C.N. Cofrentes y puntualmente para otras centrales nucleares y térmicas de IBERDROLA. Entre 1989 y 1994 desempeñó primero la jefatura de proyecto del APS de C.N. Cofrentes y posteriormente de C.N. Vandellós II. A partir de 1995 es responsable del apoyo de ingeniería de sistemas a C.N. Cofrentes, pasando en 1996 a ser jefe de la Sección Mecánica del Departamento de Generación Nuclear de IBERDROLA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA.



Ignacio MARTÍNEZ GOZALO es Ingeniero Industrial por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid. Inició sus actividades profesionales en la Cátedra de Tecnología Nuclear de la mencionada escuela, trabajando en diversas áreas, con especial dedicación al impacto del campo de radiación en la evolución de los experimentos PHEBUS FP, publicando diversos trabajos y ponencias al respecto. En 1995 se integra en la Sección Mecánica del Departamento de Generación Nuclear de Iberdrola Ingeniería y Consultoría, donde actualmente presta sus servicios.