

El rol del profesional en M&V en proyectos de desempeño energético

Texto elaborado por la Secretaría de Energía del Ministerio de Desarrollo Productivo de Santa Fe

01. Objetivo del documento

El presente escrito tiene por fin acercar contenido técnico, a partir de bibliografía internacional especializada, en la aplicación de la disciplina de la Estadística a proyectos de mejora del desempeño energético; esto se hace fundamentalmente a través de la capacitación en la temática para los «Gestores Energéticos para la Industria». Este profesional será precisamente el responsable técnico del Plan de Medición y Verificación del Desempeño Energético.

Se sugiere que este texto sea analizado en conjunto con las pautas para la celebración de contratos tipo *ESCO* publicados por la Secretaría de Energía de Santa Fe.

Este documento no es introductorio a la Estadística y describe la aplicación de la misma al concepto de desempeño energético. A efectos de recordar los elementos introductorios de esta rama de la Matemática, puede consultarse cualquier libro de grado.

02. Términos y definiciones

1. *ESCO/ESE*

Sigla para *energy service company* o bien «empresa de servicios energéticos» (en adelante, *ESCO*), persona física o jurídica que proporciona servicios energéticos o de mejora de la eficiencia energética en las instalaciones o locales de un usuario y afronta cierto grado de riesgo económico al hacerlo. El pago de los servicios prestados se basará (en parte o totalmente) en la obtención de mejoras de la eficiencia energética/desempeño energético y en el cumplimiento de los demás requisitos de rendimiento convenidos.

Una *ESCO* diseña y desarrolla proyectos de mejora de la eficiencia energética entregando o garantizando los ahorros de energía resultantes del proyecto de mejora y asegurando la eficiencia en costos de la medida y los niveles de desempeño que minimicen los costos en el ciclo de vida del proyecto.

En este modelo:

- Las *ESCO* garantizan los ahorros energéticos y aseguran el suministro de energía a menor costo a partir de la implementación de la mejora de eficiencia energética.

- Las mejoras de eficiencia energética/desempeño energético no deberían representar una erogación adicional para el cliente ya que la remuneración de los servicios de la *ESCO* proviene de los ahorros generados.
- Las *ESCO* financian o apoyan el financiamiento del proyecto de mejora de eficiencia energética.
- Asume los riesgos del proyecto de mejora de eficiencia energética/desempeño energético.

2. *EPC/CDE*

Sigla para *energy performance contract*, o bien, «contrato de desempeño energético» (en adelante, *EPC*), acuerdo contractual entre el beneficiario y el proveedor (normalmente una *ESCO*) de una medida de mejora de la eficiencia energética, cuando las inversiones en dicha medida se abonen respecto de un nivel de mejora de la eficiencia energética convenido por contrato.

3. Cliente

Empresa o institución (incluyendo municipales y comunas) que recibe el financiamiento y/o inversión de parte de la *ESCO* que se compromete a cumplir el contrato celebrado con ella para el pago de los ahorros.

4. Gestor Energético para la Industria

Profesional que ha aprobado el curso vigente del programa de «Gestores Energéticos para la Industria» y cuya identidad figura en la web:

<https://www.santafe.gob.ar/ms/eficienciaenergetica/industria-comercio/gestores-energeticos/>.

En este contexto, también es el profesional de M&V.

5. Auditoría energética

Documento estandarizado que recoge un análisis sistemático de la eficiencia energética, el uso de la energía y consumo de la energía en un determinado establecimiento e incorpora oportunidades de mejora del desempeño energético. A los efectos del Decreto N°1070/2024 de Santa Fe es sinónimo de «diagnóstico energético».

6. M&V

Sigla para «medición y verificación», proceso que involucra una amplia gama de técnicas de medición, verificación y análisis para la cuantificación de los resultados de eficiencia de recursos y actividades de gestión de recursos.

7. Plan de M&V

Planificación de las actividades conducentes a realizar el proceso de M&V en un proyecto de eficiencia energética. El/los Gestor/es Energético/s será/n el/los responsables de todo el proceso de M&V, incluyendo su planificación.

8. Energía secundaria o vectores energéticos

Diferentes tipos de energías obtenidas a partir de energías primarias u otras secundarias a las que se le realizan transformaciones para ser consumidas. Pueden resumirse en: electricidad (producida de fuentes primarias o secundarias), gas distribuido por redes, gas licuado de petróleo (GLP), combustibles líquidos y sólidos, entre otros.

9. Energía útil

Energía que dispone el consumidor final luego de su última conversión, la cual tiene como objetivo satisfacer la prestación o servicio energético.

10. Sistema energético

Integración de equipos en grupos lógicos con el fin de abastecer una necesidad energética. Ejemplos son sistema de generación, transporte y distribución de aire comprimido, sistema de refrigeración industrial, sistema hidráulico, entre otros.

11. Eficiencia energética

Proporción entre los productos y servicios obtenidos y la energía consumida para obtener dichos productos o servicios.

12. Uso racional de energía

Uso mínimo de energía para lograr un determinado fin, teniendo como criterio fundamental el no desaprovechamiento de energía y centrándose en la propia utilidad. Puede basarse en aspectos técnicos o bien convenios basados en apreciaciones técnicas.

13. Desempeño energético

Resultados medibles relacionados con la eficiencia energética, el uso de la energía y el consumo de la energía.

14. Indicador de desempeño energético

En adelante, IDEn, es la Medida o unidad de desempeño energético tal como lo define la organización en cuestión. Pueden establecerse para toda la organización, por sistema energético y/o individual (por instalación, línea de producción o equipo).

15. Variable relevante

Factor cuantificable que impacta en forma significativa en el desempeño energético y cambia de forma rutinaria.

16. Factor estático

Factor identificado que impacta en forma significativa en el desempeño energético y que no cambia en forma rutinaria

17. Línea de Base Energética

En adelante, LBE_n, referencia cuantitativa que proporciona la base de comparación del desempeño energético.

18. Incertidumbre estadística

En este contexto, refiere al grado de confianza en la precisión y confiabilidad de los datos recolectados y analizados. La incertidumbre puede aumentar debido a factores internos y externos al profesional de M&V. Identificar sus fuentes, cuantificarlas y gestionar su influencia es un componente crítico del proceso de M&V.

19. Sistema de Gestión de la Energía

En adelante SGE_n, conjunto de elementos interrelacionados o que interactúan para establecer una política y objetivos energéticos, y los procesos y procedimientos necesarios para alcanzar dichos objetivos. La norma de referencia es ISO 50001:2018.

03. Referencias y bibliografía

- Directiva 2006/32/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, Unión Europea.
- *The Role of the Measurement and Verification Professional_ Judgment and Decision-making in the Application of M&V*, de Kromer, S., editorial River Publishers, Association of Energy Engineers, 2024.
- *Energy Management Handbook*, de Duty, S. y Turne, W., 8th edition, Fairmont Press, Inc, 2013.
- *Handbook of Energy Audits*, de Thumann, A. et al, 9th edition, Fairmont Press, Inc, 2013.
- Documentos del «Protocolo Internacional para la Medición y Verificación del Desempeño Energético», Efficiency Valuation Organization.
- «Eficiencia energética: Cómo evitar errores estadísticos en la Medida y Verificación», de Poquet, R. y Sastre, J., Emin Energy, editorial Obrapropia, 2014.
- *EN 16247:2022: Energy Audits*, Unión Europea.
- *ISO 17741:2016: General technical rules for measurement, calculation and verification of energy savings of projects*, ISO.
- *ISO 50006:2023: Energy management systems — Evaluating energy performance using energy performance indicators and energy baselines*, ISO.
- *ISO 50015:2014 Energy management systems — Measurement and verification of energy performance of organizations — General principles and guidance*, ISO
- *ISO 50046:2019: General methods for predicting energy savings*, ISO.
- *ISO 50047:2016: Energy savings — Determination of energy savings in organizations*, ISO.

- *ESCO Contracts*, International Energy Agency.
- Programa «E+e PRODUCTIVA», Decreto N°1070/2024, Santa Fe.
- «Manual de Uso de la Calculadora de Ahorro y Eficiencia Energética», Secretaría de Energía, Ministerio de Desarrollo Productivo de Santa Fe, 2024.
- *Analysis of barriers and drivers for the development of the ESCO markets in Europe*, de Bertoldi, P. y Boza-Kiss, B., Energy Policy, pp- 345-355, Elsevier, 2017.

04. Caracterización técnica de un plan de M&V y su abordaje desde la Estadística

1. La necesidad de un plan de M&V. Generalidades.

El objetivo de las actividades del plan de M&V es llegar a un acuerdo: la ejecución de los pagos que dan cuenta de los impactos (resultados) del proyecto de gestión de energía. Para ello, M&V requiere: i) recolección de datos; ii) la determinación respecto de qué mediciones se harán, en dónde, por cuánto tiempo y a qué costo; iii) cómo los datos serán analizados y ajustados; iv) cómo los resultados del estudio serán reportados.

Los sistemas energéticos existen para satisfacer una prestación y, en el proceso, requieren consumir energía. Por su parte, cada instalación fue diseñada para cumplir con las necesidades de sus usuarios y partes interesadas (producir, comunicar, iluminar, lograr el confort higrotérmico, entre otros).

A su vez, cada sistema opera en una matriz de restricciones físicas, financieras y requisitos regulatorios. Algunas de estas restricciones se encuentran en el seno de la instalación por sus necesidades intrínsecas (por ejemplo, renovaciones de aire por hora en hospitales), mientras que otras se relacionan con códigos de edificación o normativas que deben cumplirse (ordenanzas, resoluciones, leyes, entre otros instrumentos legislativos, incluyendo la aplicación de estándares mínimos de eficiencia energética - *MEPS*- o simplemente compromisos propios y/o de la cadena de valor, como la certificación de un SGEEn según ISO 50001:2018). La naturaleza de estos requisitos se ajusta al propósito del sistema energético: si en el sector Comercial, Público y Residencial las restricciones se relacionan con la climatización la calidad del aire de las habitaciones, la iluminación y el diseño para que la instalación cumpla con dichos propósitos, en el caso Industrial las limitantes se asocian con los niveles de producción y/o manufactura, los requisitos de higiene y seguridad, la disponibilidad de vectores energéticos, entre otros.

Por tal, el desafío de M&V es comprender las necesidades y preferencias de los sistemas energéticos de interés. En algunos casos se plantea una reducción en el consumo absoluto de energía, mientras que en otros será el valor de energía por unidad de producto elaborado o consumo específico; finalmente, un tercer caso se relaciona con la necesidad de cumplir los requisitos y normativas legales aplicables correspondientes.

Todo plan de M&V debe considerar qué requisitos y necesidades presentan los sistemas energéticos que componen el objeto de estudio de la auditoría energética y del proyecto de eficiencia o desempeño energético.

Las intervenciones en eficiencia energética (tales como recambio/actualización de equipamiento, buenas prácticas en los distintos sistemas energéticos, incluyendo el de producción, entre otros) pueden ser llevadas a cabo por fuera de un *ESPC* si se desea. En estos casos, el cálculo de los indicadores financieros más conocidos (VAN, TIR, período simple de recupero) pueden ser suficientes; para ellos, el costo es parte de los elementos de entrada y el ahorro se estima comparando contra un escenario hipotético, en donde, por lo general, sólo interesa la mejora porcentual. Aquí, si se ejecuta la intervención, el hecho de estar operando con nuevas condiciones ya alcanzaría a concretar el repago, y un plan de M&V, para proyectos de estas escalas puede no ser necesario.

Ahora bien, a medida que la situación crece y se establece la mejora de indicadores (los llamados *KPI -key performance indicators-*), estos proyectos transitan a ser mejoras integrales en las distintas instalaciones. Por tal, es preciso tener en cuenta los múltiples factores y dimensiones que atraviesan los impactos de la mejora.

Se sugiere hablar de «impactos» por sobre «ahorros» dado que hay beneficios o externalidades positivas producto de las intervenciones que no son cuantificables en términos económicos. Por ejemplo, además del ahorro generado mediante la implementación y certificación de un SGE_n, el reconocimiento en el mercado y sociedad y la mejora de la imagen no es un elemento de fácil cuantificación. Es por ello que «impacto» es más conducente a interpretaciones completas.

A simple vista, el proceso de M&V puede parecer sencillo: recolectar datos de consumo de energía antes y después de la implementación de las intervenciones en eficiencia o desempeño energético y luego proceder a la comparación para determinar los impactos. Si bien desde la teoría es sencillo, en la práctica la realidad reviste varios aspectos y dimensiones a considerar, lo que lo vuelven en una tarea casi ad hoc a cada proyecto.

Las instalaciones no permanecen constantes en su funcionamiento y operación durante un tiempo que permita una comparación homogénea antes y luego de las intervenciones. Esto se refuerza con el hecho de que los impactos de las intervenciones pueden repotenciarse y/o provocar dobles efectos entre ellas. Por ejemplo: una reducción de la

presión de servicio de aire comprimido de 7 a 6 bar arroja un ahorro de 6 % (por cada bar se estima una disminución de 6 % aproximadamente) y, a su vez, las fugas pueden contabilizar el 5 % del consumo de energía asociada. A la hora de estimar los impactos por la implementación de esas dos medidas, sería incorrecto modelizar una reducción de 11 %, dado que primero deben repararse las fugas y luego, sobre el consumo resultante, reducir la presión de servicio en 1 bar. La disminución, por ende, es inferior al 11 %. Doble-contabilizarlo provocaría sobredimensionar los impactos estimados, con la posibilidad de que no alcancen a cumplirse con los objetivos propuestos de los distintos *KPI* en el plan de acción respectivo.

Una frase que sintetiza el concepto de eficiencia y de desempeño energético es: «los ahorros no se miden, se definen». En términos concretos, se está comparando un sistema mejorado (intervenido) contra algo que no existe, esto es, contra la versión del mismo sistema sin intervención, pero que, en dicha comparación, no se puede asegurar determinísticamente que las condiciones de antes y después sean exactamente las mismas. En rigor de verdad estadística, nunca lo son y precisamente el plan de M&V busca definir mecanismos para llevar adelante el contraste lo mejor posible. Para ello se precisa de datos e información. La salida del proceso de M&V es, justamente, la determinación de esta comparación y los impactos estimados.

Los resultados del plan de M&V pueden definirse en dos categorías: verificación del desempeño e impactos. Si bien parecen conceptos similares, presentan una marcada diferencia: el desempeño es una medida de cuán bien un sistema o proceso está funcionando, mientras que el impacto es una medida de los beneficios operacionales que resultan, a lo largo del tiempo, debido a dicho desempeño mejorado. En detalles:

- Desempeño refiere a qué tan bien un sistema o proceso está funcionando, esto es, en qué grado los objetivos de mejora son cumplidos. Puede ser medido de varias maneras dependiendo del sistema o proceso. Este beneficio siempre proviene del desempeño de una característica del sistema.
- Los impactos, por otro lado, se refieren a la reducción del consumo de recursos (o su costo) a lo largo del tiempo producto de la mejora de un desempeño. Puede ser cuantificado en términos de impacto financiero (menores costos) y/o ambientales (como reducción de los gases de efecto invernadero). Es, por tanto, definido como una cantidad.

Así, el desempeño puede ser medido, pero el impacto requiere de un modelo construido a partir de mediciones. El plan de M&V busca precisamente una metodología para determinar estos impactos. El flujo de M&V se ilustra en la Figura 1.

Por tanto, en línea con lo anterior, un plan de M&V correctamente diseñado y dimensionado debe ser claro en las expresiones de cálculo (basadas en el

comportamiento físico de la energía y de la prestación a satisfacer) y, fundamentalmente, en cómo se determinarán los impactos producidos del proyecto, los cuales definen los pagos del cliente hacia la ESCO. Esto permite demostrar transparencia, credibilidad, solvencia técnica, robustez y, a su vez, reducir la probabilidad de desentendimientos, malos entendidos y procesos de litigio.

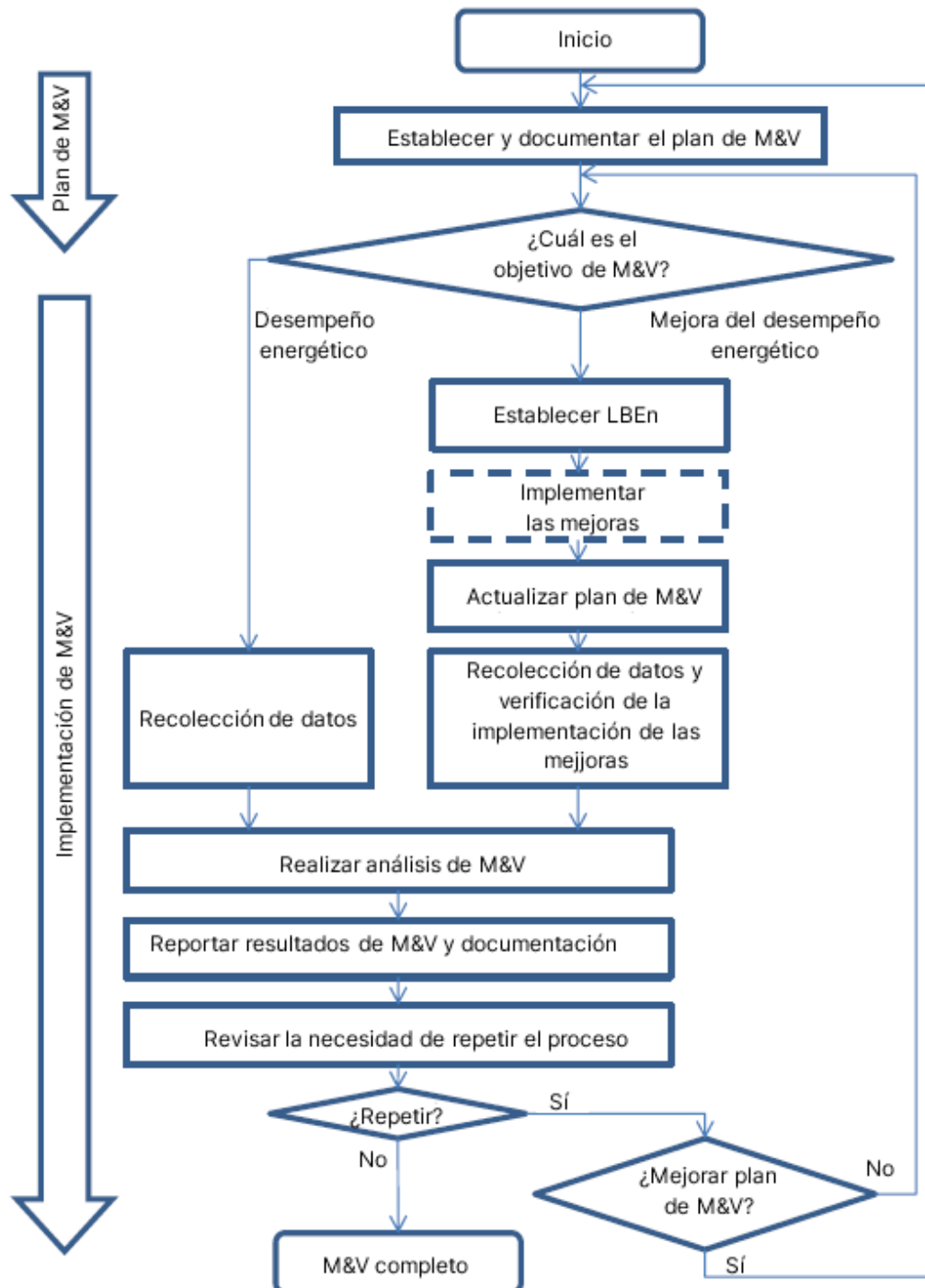


Figura 1: Descripción del flujo de M&V (adaptado de ISO 50015:2014, anexo A)

2. Métodos contrafácticos. Tipos y principales características.

En función de lo visto, el plan de M&V, ya sea por mejora de desempeño o cuantificación de impacto, requiere, para ambas categorías, comparar un resultado que ocurrió (el valor real de la energía, comúnmente medido a través de un IDEn o indicador específico de eficiencia energética) contra un resultado hipotético que no ocurrió (lo que la instalación hubiera consumido de no haberse efectuado el proyecto). Es por ello que a los escenarios de modelización se los denomina «métodos contrafácticos».

Estos procedimientos pueden clasificarse en dos: transversal y longitudinal;

- En el primero, el contraste es de la forma «con vs sin», o sea, entre el proyecto ejecutado vs un grupo de comparación (conocido en la epistemología como «grupo de control»);
- En el segundo, la comparación es de la forma «antes vs después», es decir, se compara al sistema objeto del proyecto contra sí mismo a lo largo del tiempo, previo y post las intervenciones. Esto requiere un modelo del sistema previo que sea capaz de proveer un caso de referencia contra el cual comparar el sistema ya intervenido y mejorado. Esta es precisamente la definición de LBEn.

Para ejecutar el modelo longitudinal, es fundamental especificar todos los detalles para la construcción y elaboración de la LBEn, incluyendo el «Período de LBEn», el cual es la serie temporal de datos del sistema en cuestión previo a la intervención, y que servirán de base estadística para la elaboración de los valores de energía estimados (lo que hubiera consumido). Por otro lado, es necesario también precisar el «Período de Reporte», definido como el período del sistema en cuestión intervenido y mejorado, y cuya comparación acumulada proporcionará el ahorro a lo largo del horizonte del proyecto.

Una LBEn eficaz contabiliza los factores que influyen en el consumo energético o que se considera que probablemente lo hagan durante el período de reporte (lo que requiere ajustes, como se indica más adelante). A partir de esto se establece «lo que hubiera pasado».

Una variante de esta situación es cuando la LBEn es construida aplicando la normativa que debería cumplirse (códigos, estándares, buenas prácticas industriales, compromisos asumidos, entre otros), modelo que a menudo se llama «lo que debería haber pasado».

Ambas situaciones se ilustran a continuación:

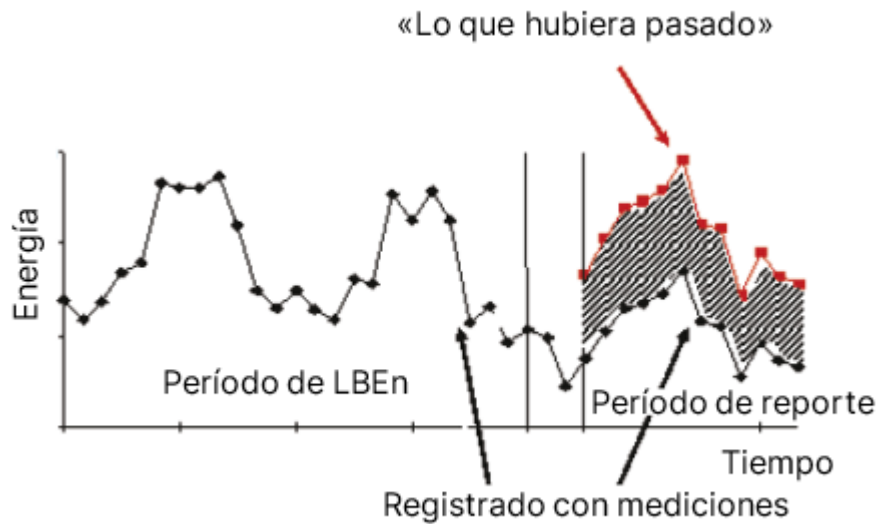


Figura 2: Modelo de LBEn de «lo que hubiera pasado» (adaptado de Kromer, S., 2024)

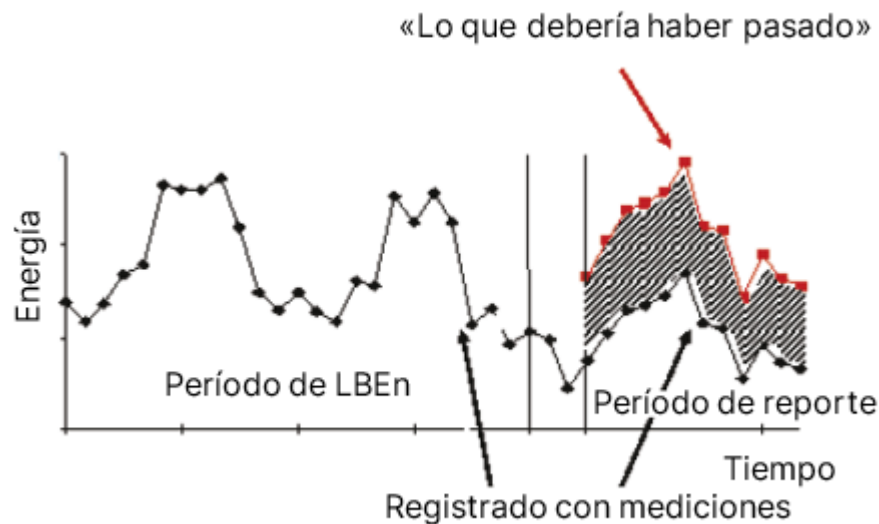


Figura 3: Modelo de LBEn de «lo que debería haber pasado» (adaptado de Kromer, S., 2024)

No obstante, a medida que se va desarrollando y ajustando el modelo de la LBEn, el juicio y criterio del profesional de M&V resulta clave para poder cuantificar los impactos lo mejor posible. En efecto, las salidas de los análisis contrafácticos son tan robustos y confiables como lo sea el modelo de la LBEn empleado, y la precisión de los resultados dependerá de la calidad y completitud de los datos, hipótesis y condiciones de borde usados para construir dicho modelo.

Dado que cualquier modelo de LBEn será el resultado de la completitud y criterio, los impactos resultantes variarán conforme los detalles del proyecto en ejecución. Como se expresó, los impactos no son medidos directamente, sino que siempre están en función del método aplicado. No hay cálculo de impacto totalmente preciso hasta tanto se elija el abordaje de M&V y el plan sea definido.

Finalmente, una última variante es cuando se compara no solamente con el resultado de la intervención, sino con lo que estaba planificado en función de esa intervención, es decir, el esquema incorpora una medida de la efectividad de la mejora al comparar el real vs estimado y el «planificado según mejora» vs estimado:

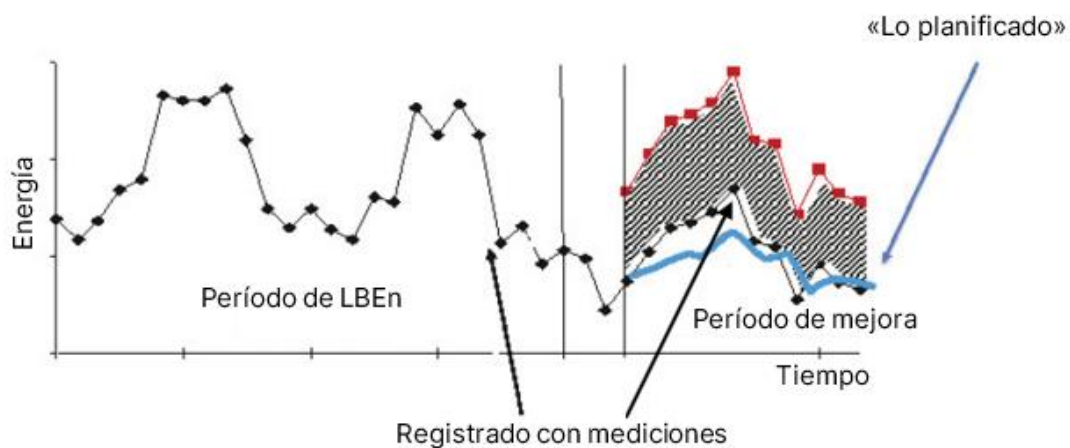


Figura 4: Modelo de LBEn de «lo planificado» (adaptado de Kromer, S., 2024)

El profesional de M&V es capaz de asegurar que el modelo usado para implementar el modelo contrafáctico está fundado en principios físicos mediante las siguientes acciones:

- desarrollar un claro entendimiento de los principios físicos ingenieriles subyacentes que gobiernan el sistema en estudio. Esto incluye la identificación de las principales variables y cómo se relacionan entre sí;
- usar este entendimiento para desarrollar un modelo conceptual del sistema que capture las relaciones de causa-efecto;
- traducir este modelo conceptual en uno matemático que pueda usarse para simular el comportamiento del sistema a lo largo del tiempo;
- validar el modelo empleando datos reales y ajustarlo según sea necesidad para mejorar su precisión;
- usar el modelo para llevar adelante análisis de sensibilidad con el fin de determinar cómo los cambios en las variables de entrada impactan en las de salida;
- probar la precisión predictiva del modelo comparando sus salidas con las reales del sistema;
- usar el modelo para efectuar análisis contrafácticos cuidadosamente seleccionando las variables apropiadas.

3. LBEEn. Ajustes rutinarios y no rutinarios. Cambios en los factores estáticos.

Durante la fase de planificar M&V, se caracteriza el proceso a partir del alcance del proyecto, los objetivos, la LBEEn y sus comparaciones y los IDEn. También se elabora un borrador con los detalles de cómo los datos serán recolectados, analizados y reportados, involucrando a todas las partes en lo que refiere a la metodología y procedimientos que serán empleados.

Al momento de ejecutar M&V, los profesionales recolectan y analizan los datos descriptos en el plan. Finalmente, deben verificarse los resultados del proyecto y resolver cualquier tipo de disputa. En simultáneo, se brinda una devolución de todo el proceso.

Este enfoque de tres grandes etapas (distribuidas en el flujograma mostrado) ayuda a garantizar un proceso sistemático, estructurado e iterativo, propio del espíritu de la mejora continua, siendo los resultados la fuente de confiabilidad. Ahora bien, como se ha establecido, la clave está en la elaboración de la LBEEn.

La LBEEn es el conjunto de referencia recolectado durante el Período de LBEEn. Estos datos por lo general incluyen toda la información requerida para construir el modelo de la propia LBEEn, la cual puede ser ajustada durante el Período de Reporte.

Además de los datos históricos de los usos de energía para un período en concreto, es necesaria la siguiente información adicional:

- Propiedades del sistema o instalación, como pueden ser el tamaño, layout y características operativas.
- Datos históricos de uso de energía, obtenidos a través de las facturas de las distribuidoras, medidores aguas abajo del de la distribuidora, telemedición, instrumentos conectados de manera permanente.
- Clima, cuyos datos son usados generalmente para normalizar los consumos de energía de manera de tomar en cuenta las condiciones climáticas a lo largo del tiempo que pueda afectar dicha variable. Por lo general son empleados en los análisis de las variables relevantes en procesos de transferencia térmica y/o higrótérmica (incluyendo ciertos procesos de producción y compresión de gases).
- Datos de ocupación y uso de la instalación, como tasas de ocupación (con sus respectivos horarios), uso de tecnologías, entre otros.
- Especificaciones de equipamientos, lo cual refiere a detalles de los equipos y sistemas energéticos propios del establecimiento.

- Otros factores relevantes que puedan afectar el consumo de energía, como cambios en los factores estáticos o cuadro tarifario y precios de energía.

Gran parte de estos datos son generalmente recolectados en la auditoría energética (también llamada diagnóstico). Mientras más completa sea la auditoría, más información de calidad podrá emplearse para la construcción de la LBEn. No obstante, la auditoría, no solamente tiene un costo, sino que de ella saldrá el potencial proyecto de mejora de eficiencia energética/desempeño energético. Por tanto, siempre debe tenerse presente las necesidades del cliente y la precisión requerida del proyecto.

Además, el profesional debe asegurarse que todas las partes estén al tanto de las decisiones, incluyendo las condiciones de borde, hipótesis y compromisos asumidos (en el marco de lo técnico y recolección de datos) de modo de crear la LBEn más apropiada a los propósitos del proyecto.

En relación con el Período de LBEn, si bien en parte depende de las circunstancias específicas del proyecto y del criterio del profesional, este lapso debe ser:

- lo suficientemente largo para establecer un patrón representativo del consumo de energía, pero también
- lo suficientemente corto como para no incluir modificaciones en los factores estáticos que no se espera que se repitan en el Período de Reporte (como cambios en el personal, tecnología o incluso el propio mercado o condiciones estructurales del lugar).

Para la mayoría de los planes de M&V, los datos de usos de energía en el Período de LBEn son analizados para poder construir el modelo que caracterice al desempeño del objeto de estudio durante dicho período. Así, el modelo de la LBEn se ajusta para comparar con los usos actuales de energía y determinar los impactos.

Cuando se construye la LBEn, hay varios aspectos por considerar, entre los que se incluyen:

- Disponibilidad de datos y precisión.
- Representatividad de los datos.
- Normalización y ajustes por clima.
- Complejidad estadística del propio modelo.
- Análisis de sensibilidad.

La LBE_n ajustada se usa en la implementación del método contrafáctico, concretamente en el Período de Reporte. Se crea ajustando/actualizando el modelo de la LBE_n para reflejar los cambios en los factores que afectan el consumo de energía, pero estos no son resultados reales, sino estimados.

Este proceso de ajuste (que debe estar detallado en el plan) involucra el uso de análisis estadísticos y técnicas de modelización para aislar los efectos de factores influyentes y estimar el consumo de energía que hubiese ocurrido ante la ausencia de dichos factores. En relación con el ajuste, existen dos tipos a considerar:

- Ajustes rutinarios
- Ajustes no rutinarios

Los ajustes rutinarios son los usados para calcular la LBE_n ajustada durante el Período de Reporte empleando las variables relevantes (independientes por naturaleza) obtenidas. Los modelos estadísticos suelen expresar la relación de consumo de energía vs variables independientes en funciones univariadas, pero no siempre ocurre ello.

Por otro lado, los ajustes no rutinarios refieren a cualquier cambio en la instalación u objeto de estudio que ocurre durante el Período de Reporte que no fue explícitamente parametrizado (tomado en cuenta y considerado como un parámetro) en el modelo de la LBE_n. Estos pueden ser: i) cambios en las operaciones; ii) cargas sumadas o retiradas; iii) desastres naturales; iv) fallas en equipos y/o paradas no programadas; v) cualquier circunstancia no prevista que tenga un impacto significativo en el uso de energía de la instalación u objeto de estudio.

Una subcategoría de estos ajustes no rutinarios es cuando se producen cambios en factores que impactan en el desempeño, pero que no son fácilmente cuantificables o la unidad de asignación es intangible (como un nuevo diseño de un producto existente, el diseño de un nuevo producto, el cambio tecnológico dentro de la instalación u objeto de estudio, la solución constructiva de la envolvente edilicia, entre otros): son los llamados factores estáticos.

Según los límites de la medición, se espera que ocurran cambios en el Período de Reporte. El profesional, por tanto, debe emplear su criterio y decidir cuándo ajustar los datos en función de este tipo de eventos.

Por tanto, un ajuste puede ser rutinario o no rutinario según el grado de predicción asignado. ¿Cómo entonces resulta este ajuste, esto es, cómo se lleva a la práctica? Primero se lo debe identificar, lo cual puede hacerse revisando los valores de consumo de energía y detectando cualquier desviación o anomalía. Si la causa es esporádica y puede asegurarse que no volverá a ocurrir (en realidad, su probabilidad de volver a ocurrir es muy baja), una posibilidad puede ser catalogar este valor como atípico (*outlier* en

Estadística) y retirarlo, pudiendo a su vez reemplazarlo con el promedio de los valores antes y después, a efectos de suavizar la curva.

En cambio, si el ajuste no es debido a un error o falla, sino a un cambio planificado, entonces debe ajustarse la LBEn para reflejar esto, dado que esta modificación, una vez hecha, cambia las condiciones de borde. Una industria, instalación o edificio no permanecerá invariable de modo tal que una LBEn se ajuste de manera perfecta, por el contrario, deberá ajustarse la LBEn para poder reflejar estos cambios. Por ejemplo, si en cierto momento se agrega un turno extra para producir mayor cantidad, sin vistas en el horizonte a que dicho agregado desaparezca, entonces pueden normalizarse los valores de consumo a obtener los valores específicos o unitarios de manera de poder reflejar este nuevo turno, a la vez que se deben ajustar los tiempos de uso, factores de carga y rendimientos de los distintos sistemas energéticos.

La detección de fallas depende en parte del criterio de los cuadros técnicos de las partes y la causa raíz fácilmente identificada, pero en otras situaciones pueden emplearse herramientas (como el diagrama de causa-efecto, también llamado diagrama de Ishikawa) de modo de aislar lo más posible el real motivo. Esta situación, en términos de un SGEEn, debería relevarse como una no conformidad y ser tratada como tal.

Por otro lado, las técnicas de mantenimiento predictivo (termografías, análisis de régimen transitorio y corrientes nominales, entre otros) pueden contribuir en la detección anticipada de una potencial falla.

Otro mecanismo para detectar estos desvíos es la inspección física. Si bien estudiar el consumo de energía facilita la visualización de patrones, puede no ser suficiente. Un impacto positivo que no esté saliendo como se esperaba o un IDEn cuyo valor no está siendo el que debería puede tener múltiples causas, incluso que se retroalimenten entre sí y/o se comporten de manera no lineal. A modo de complemento, revisar las instalaciones completa el panorama. Por caso, una fuga de aire comprimido puede no ser fácilmente detectable en los consumos, inclusive con medidores dedicados, pero sí lo es al recorrer el piso de planta y escucharla.

En resumen, la forma de abordar el ajuste depende fuertemente de su naturaleza. Sea cual fuere el tipo de ajuste y, sobre todo, el método, criterio y mecanismo de dicho cambio, todo debe quedar documentado y comunicado para todas las partes.

Ahora bien, se presenta la siguiente situación: una industria, previo a la implementación del plan de M&V, no está cumpliendo las normativas o compromisos correspondientes (por ejemplo, nivel de iluminación en las áreas de trabajo) y, una vez que se implementaron las mejoras considerando dichas condiciones previas, resulta ahora que el consumo es distinto, y posiblemente superior al inicial. ¿Todas las partes estarán de acuerdo con la LBEn planteada? La ESCO puede argumentar que debe ajustarse para reflejar las condiciones, de manera de que el ahorro sea superior, mientras que el cliente

puede explicitar que la normativa ahora es posible de cumplir. El profesional debe tomar el mejor criterio dado que esto también define los impactos y, por lo tanto, el ahorro y los pagos del cliente a la *ESCO*.

Previo a documentar la LBE_n, la auditoría debe tener la suficiente precisión para poder identificar cualquier situación como la del ejemplo anterior a ser abordada. Idealmente, una vez que todos los aspectos han sido resueltos, la LBE_n puede ser documentada en función del desempeño corregido (o sea, luego de haber resuelto). En algunos casos, puede ser necesario ajustar el Período de LBE_n durante el cual la instalación no estaba funcionando apropiadamente.

Si el Período de LBE_n contiene operaciones cuya extensión ha variado, el profesional debe usar su criterio para seleccionar el nivel de operaciones más representativo. Alternativas pueden ser, pero no se limitan a: i) duración normal de la jornada; ii) estudio del mix de producción y selección de las familias con criterios técnicos, como «el Principio de Pareto»; iii) selección mediante el criterio «ABC» de las familias y, por lo tanto, de las operaciones; iv) diseño de un producto hipotético con todas las operaciones; v) normalizar los consumos de energía por hora (aún sabiendo que el rendimiento varía conforme lo hace la jornada); vi) selección de los productos según un análisis «FODA» del establecimiento, donde se seleccionen los más críticos y que hacen a su supervivencia, entre otros.

Si hay condiciones futuras de las operaciones que ya son conocidas o planificadas (una mudanza, una expansión, la incorporación/reemplazo de una tecnología, un nuevo diseño de producto, un nuevo producto, entre otros), deberían ser incorporadas a través de un análisis de sensibilidad o como factores de ajuste (en lugar de incorporarlas directamente a la LBE_n). Esto permitirá una representación más adecuada del potencial impacto de las actividades de funcionamiento del establecimiento, a la vez que se conserva la integridad del Período de LBE_n. Así, todas las partes deben acordar en que las operaciones futuras serán similares a las de la LBE_n, o al menos lo suficiente como para que, ajustes mediante, la comparación sea lo más apropiada posible.

Por tanto, ¿cómo debería ser una LBE_n? Estas son sus características principales:

- Consistente: la LBE_n debe conservar coherencia con los registros históricos de consumo, horas operativas y todo otro factor que influya en el consumo de energía.
- Normalización: los modelos de LBE_n debe considerar los factores que afectan el consumo y que su gestión se encuentra por fuera del alcance del proyecto (condiciones climáticas, niveles de ocupación y/o cantidad de unidades producidas).
- Precisión: la LBE_n debe poder predecir el consumo de energía en condiciones normales de operación lo más preciso posible.

- Transparencia: la LBEEn debe ser transparente y fácilmente entendida por todas las partes, incluyendo al equipo del cliente, de la ESCO y profesionales de M&V.
- Repetibilidad/exactitud: el modelo de LBEEn debe producir resultados consistentes cuando sea usado por todas las partes involucradas.
- Simplicidad: el modelo debe ser lo suficientemente simple como para ser implementado y entendido por todas las partes.
- Análisis de sensibilidad: el modelo debería ser evaluado empleando análisis de sensibilidad para estimar el impacto que generan los distintos elementos de entrada al plan de M&V (fundamentalmente variables relevantes) sobre las predicciones de los consumos de energía.

Finalmente, dado que la construcción matemática de la LBEEn parte de los IDEn, también es necesario elaborarlos de manera apropiada. Teniendo en cuenta que no existe un indicador que logre reflejar absolutamente todos los escenarios y que, por lo tanto, se trabaja con un conjunto de ellos, ISO 50006:2023 sintetiza los modelos matemáticos que pueden adoptar los IDEn:

- Estadísticos, que pueden ser:
 - Regresión lineal univariable de la forma $Y = m \cdot X + C$, en donde la pendiente m es el cambio unitario del consumo de energía por unidad de la variable independiente $-dY/dX-$ y la ordenada al origen C es lo que se conoce como «carga base» (consumo de energía independiente de la variable relevante, como las puestas a punto).
 - Métrica simple (que sería un caso particular del modelo lineal sin pendiente, es decir, $Y = C$)
 - Ratio o cociente (que sería un caso particular del modelo lineal sin ordenada al origen, es decir, $Y = m \cdot X$).
 - Regresión lineal multivariable de la forma $Y = m_1 \cdot X_1 + m_2 \cdot X_2 + \dots + m_n \cdot X_n + C$. Como ejemplo, se tiene que el consumo de energía eléctrica en una fábrica de bebidas gaseosas depende no solamente de la cantidad de litros producidos, sino también de la temperatura de carbonatación.

Los modelos lineales univariables son fácilmente representables en un diagrama de dispersión, mientras que los multivariables sólo pueden graficarse fijando todas las variables independientes excepto una y analizando su influencia, repitiendo este proceso para todas las variables intervinientes.

- Modelos agregados, que combinan varias tipologías. Aquí se encuentran, por ejemplo, las regresiones no lineales y los escalonados (por ejemplo, hasta cierto valor se aplica una ley matemática y superado ese umbral, otra).
- Modelos ingenieriles, los cuales son fundamentalmente simulaciones que emplean principios ingenieriles, ecuaciones de la física y química de la energía y las reglas que gobiernan la producción/operación en cuestión.

Para lograr completar la definición del modelo matemático, es necesario determinar estadísticamente cuán apropiado es, lo cual lo aborda el siguiente capítulo.

4. Modelos estadísticos en M&V. Herramientas de modelización.

Los modelos estadísticos, como se ha visto, se basan en los registros de consumo de energía históricos y presente recolectados y analizados durante el Período de LBE. El objetivo de un modelo estadístico es establecer los parámetros (los coeficientes de las relaciones funcionales matemáticas) que representan el comportamiento del consumo de energía estudiado en el Período de LBE.

Otro tipo de modelos empleados son los físicos, los cuales se emplean para representar las relaciones entre procesos y las interacciones que llevan al consumo de energía. Para lograrlo, se usan técnicas matemáticas y computacionales; junto con las hipótesis, condiciones de borde, reglas y mecanismos que gobiernan los sistemas, se logra simular el comportamiento del objeto de estudio a lo largo del tiempo.

Los modelos físicos de M&V más comunes incluyen modelos de sistemas individuales, tales como HVACR, iluminación, envolventes, así como aquellos basados en las instalaciones desde un punto de vista global en donde interactúan todos los sistemas energéticos en estudio. Estos modelos emplean principios físicos del comportamiento de la energía (como termodinámica, transferencia de calor y mecánica de los fluidos) para reproducir los comportamientos necesarios.

En general, los modelos estadísticos se centran en estimar las relaciones entre variables usando datos, mientras que los físicos o de simulación requieren un entendimiento de los mecanismos y procesos subyacentes que dan origen a los datos de consumos. Ambas categorías tienen sus ventajas y desventajas, y la elección depende del alcance del plan de M&V y de los datos disponibles.

En lo que sigue, el documento abordará solamente los modelos estadísticos.

Los modelos estadísticos parten por tanto de los datos de consumo de energía, pasados y presente (elemento de entrada en correspondencia con el subcapítulo 6.1 «Revisión

Energética» de ISO 50001:2018). Por tal, y dado que la energía es la variable dependiente, es necesario conocer las características del proyecto para entender a qué se deben tales consumos. Luego, deben relevarse las variables independientes que, a priori, explican los valores registrados/relevados.

En rigor científico, múltiples variables independientes (con efectos no lineales e incluso repotenciándose entre ellas) definen los consumos de energía. No obstante, hacer este análisis requiere casi de recursos infinitos, tanto de elementos de entrada como en capacidad de procesamiento. Por tal, no es factible en cuanto a recursos analizar los parámetros poblacionales, sino que se los infiere a partir de sus equivalentes estadísticos muestrales.

El registro de datos del Período de LBEEn es precisamente una muestra cuyos datos corresponden a una determinada medición, la cual no está exenta de incertidumbres. Si bien entonces esto parecería un problema sin solución, a efectos de gestionar la energía, interesa una solución de compromiso que permita acercarse «tanto como se pueda» según el beneficio obtenible a priori vs los costos de obtener la información (incluyendo mediciones y análisis de datos). Esta solución de compromiso se construye a partir del estudio de los procesos de la instalación, sea que se haya colocado la frontera imaginaria en toda la organización (tomando los valores registrados por las distribuidoras) como a líneas o equipos dedicados (debiendo para ello contar con submedidores). Asimismo, también se recortará el espectro de variables independientes a aquella/s que más podría/n influir en los consumos (al menos a priori).

Esta simplificación, si bien acota en precisión el valor poblacional que tendría el consumo de energía durante el Período de Reporte, permite encontrar una relación funcional matemática de fácil modelización. A menudo, la primera hipótesis (a través del concepto filosófico de la navaja de Occam) es que se estructura la causalidad en una relación lineal de una variable, esto es, que el consumo de energía depende linealmente, a priori, de una única variable independiente.

¿Cuáles pueden ser estas variables independientes? Por lo general es alguna de estas:

- Condiciones climáticas (concretamente temperatura, humedad, velocidad del viento)
- Productividad/niveles de producción o de ocupación (según la naturaleza del establecimiento)
- Momento del día o día de la semana
- Programación de la producción y horas operativas

- Programación de la iluminación y sensores de presencia
- Configuraciones (set point) y controles de sistemas energéticos

No necesariamente debe intentarse con todas por igual. Concretamente, el criterio del profesional será elegir la que, a su juicio, sea/n la/s principal/es.

Luego, el abordaje técnico partirá de: i) tener que demostrar estadísticamente si la relación funcional hipotetizada es tal; ii) si es cierto, construir la expresión matemática correspondiente; iii) estimar los consumos de energía a partir de los valores que tiene la variable independiente en el Período de Reporte (incluyendo los ajustes que sean necesarios). Si la relación funcional no es cierta, debe establecerse otra y repetir el procedimiento.

Ahora bien, ¿qué significa «demostrar estadísticamente»? Cuando se modeliza la relación funcional como lineal, se parte de la hipótesis de que «el consumo de energía depende linealmente de una única variable» es cierta, pero, concretamente, la misma debe someterse a prueba. Encontrar una recta de tendencia con un valor alto de R^2 no garantiza que se comporte linealmente, de hecho, el procedimiento debe ser al revés: primero se analiza en qué grado las hipótesis del modelo lineal teórico se cumplen para el caso en estudio y, si es afirmativo, se puede entablar dicha relación. No demostrar estadísticamente y avanzar sin ello puede resultar en un modelo no pertinente y, por lo tanto, los ahorros tienen alta probabilidad de no ser los calculados. En resumen, si el modelo no funciona, sus resultados tampoco. Por tanto, para consolidar los ahorros debe haber un alto grado de aseguramiento de que el modelo elegido es el pertinente. Para ello, se debe determinar el grado de bondad del ajuste propuesto.

A modo de recordatorio, las hipótesis del modelo de regresión lineal son¹:

- Linealidad, esto es, que pueda expresarse a partir de una ecuación lineal. Esta función puede ser única (para toda la variabilidad del rango de la variable independiente) o partida (para determinar rangos se adoptan determinados coeficientes). Estos coeficientes también son muestrales, lo que significa que cada uno a su vez tiene su propia variabilidad.
- Homogeneidad: si se denomina al «error residual» como la diferencia entre el valor verdadero y el que obtendría con la expresión lineal, si se analizan estos residuos, el valor medio del mismo debería ser cero. En otras palabras, el valor esperado del error es cero.

¹ Los libros de grado de Estadística abordan en profundidad y con ejemplos las hipótesis de los modelos posibles de aplicar.

- Homocedasticidad: refiere a que la varianza de los errores se mantiene constante, lo que permite indicar que la dispersión de los datos es uniforme a lo largo de la recta de regresión propuesta.
- Independencia: los errores no deben conducir a otros errores, esto es, no deben ser dependientes entre sí, y sólo el error atribuible a la componente aleatoria es el que debe estar presente. Estadísticamente, el valor esperado del producto de cualesquiera dos errores debe ser cero.
- Normalidad: establece que los errores no solamente presentan un promedio de cero, sino también que su desvío estándar es único y constante. En otras palabras, el desvío estándar del error tiene un solo valor y, por tanto, el error sigue una distribución normal centrada en cero y con desvío estándar constante.

Surge entonces una característica prácticamente imposible de eliminar, pero que puede reducirse con datos: la incertidumbre. Este atributo está presente en todos los modelos de todos los sistemas, y puede cuantificarse en un global como, precisamente, los errores residuales. ¿Por qué global? Existen dos categorías fundamentalmente²:

- Incertidumbre aleatoria: es la que se atribuye únicamente a la aleatoriedad propia de la muestra seleccionada y a la variabilidad del propio sistema. Puede reducirse con mayor tamaño de muestra, más muestras aleatorias simples y/o más recursos dedicados a la modelización (incluyendo la validación de sus hipótesis).
- Incertidumbre epistémica: es la derivada de la falta de conocimiento y entendimiento de las relaciones entre los componentes del sistema en estudio. Puede ser reducida significativamente a medida que se conoce y estudia el sistema; el juicio y criterio técnicos del profesional contribuyen mediante el aporte de su experiencia y trayectoria.

Asimismo, es necesario tener presente siempre que las instalaciones cambian a lo largo del tiempo debido a múltiples factores (tipo de mantenimiento, riesgos externos, confiabilidad de los equipos, cambio de personal), lo que es una manifestación de la propia entropía del sistema. Esto significa que los modelos, dado que atienden a comportamientos nominales del sistema a largo plazo, pueden no reflejar la realidad de manera constante y uniforme; sin embargo, los mecanismos de ajustes rutinarios y no rutinarios contribuyen a que, de alguna manera, sea posible modelizar el sistema. Caso contrario, la única respuesta sería la simulación (modelos físicos).

² La incertidumbre no es otra cosa que la entropía estadística.

Si bien es fundamental contar con datos, primeramente, se debe aislar el sistema del cual se pretende mejorar y obtener un ahorro. ¿Es a toda la organización (porque se cuenta con las facturas de las distribuidoras), o se lo circunscribe a una nave (porque se dispone de un medidor para la misma)? ¿Adónde se ubica la frontera, es decir, qué se estudia y qué no? Esta elección y selección es justamente el límite del sistema, el cual determina la naturaleza de los datos y las relaciones funcionales. Si el «límite» es, entonces, la frontera física, «alcance» son las actividades a evaluar dentro de dicho límite³. ISO 50006:2023, en su anexo B, ilustra los distintos niveles de IDEn y, por tanto, de límites.

La selección del límite a toda la organización tiene las siguientes características:

- Ventajas: i) los consumos de energía son los facturados por la distribuidora (en caso de único medidor, caso contrario debe analizarse); ii) si la variable independiente es el nivel de producción, puede definirse con precisión el registro de la misma; iii) los ahorros obtenibles son para todo el sistema, pudiendo demostrar resultados globales.
- Desventajas: i) debe estudiarse si una mejora en los IDEn o un impacto positivo es atribuible a las medidas aplicadas o bien a otra variable que no ha sido estudiada; ii) se establecen hipótesis a toda la organización, lo que genera un aumento considerable de la incertidumbre; iii) algunas mejoras pueden no apreciarse dado que quedan enmascaradas en la propia variabilidad y aleatoriedad del comportamiento de la instalación.

Los mismos conceptos pueden ser evaluados ante límites más pequeños.

Una vez definido el límite, continúa la obtención de los datos. La pregunta siguiente es: ¿qué frecuencia deben presentar los datos? ¿Son valores horarios, diarios, semanales, mensuales, bimestrales? Este atributo es lo que se conoce como «granularidad», e influye en la precisión.

Algunas cuestiones previas son necesarias de plantear si la disponibilidad de datos en cuanto a granularidad es variada. ¿Tiene sentido disponer de datos diarios si la variable independiente es medida semanalmente? En tal caso, si se suman los valores diarios para obtener el semanal, ¿corresponde la comparación directa? Es decir, ¿tienen el mismo origen temporal? Si el dato fuese diario, ¿es posible atribuir el consumo de energía de ese día al valor de la variable independiente? ¿Cómo influye la carga base del sistema? ¿O acaso, por ejemplo, la puesta a punto de la caldera de un día queda enmascarada y reducida cuando se analiza el consumo semanal en operación continua?

³ Ambas definiciones son precisamente las dadas en ISO 50001:2018 (3.1.3 y 3.1.4), siendo esta última aplicable si el sistema en estudio que coincide con el objeto del SGen.

La tecnología en este caso respalda el aumento de la frecuencia debido a la irrupción y ventajas de la telemedición y de la «Internet Industrial de las cosas» (*I/IoT*, por sus siglas en inglés). Por tanto, el desafío es precisamente balancear las distintas granularidades de los datos y poder sacar conclusiones; cada vez que se agrega una capa de operación a los registros (se los suma o promedia, por ejemplo) se agrega incertidumbre.

Según la naturaleza de las variables, en algunos casos se prefieren datos menos granulares de modo tal que estadísticamente se refleje el consumo (esto puede favorecer al $CV(RMSE)$, es decir, coeficiente de variación del error cuadrático medio). Por ejemplo: si se estudia el consumo de energía térmica respecto de la temperatura cuando se adquiere a discreción un combustible, una frecuencia semestral puede dar mejores resultados de variables que uno mensual. En otras palabras, si la compra de combustible es a discreción, puede haber meses en los cuales no se compre porque la temperatura está a favor (como ocurre en el verano), y eso no significa que el consumo sea nulo. Por tanto, un agregado a frecuencia semestral o trimestral (el que brinde un $CV(RMSE)$ más bajo) puede ser más útil.

En otros casos, si por caso se desea analizar el impacto que tiene la reparación de fugas en un sistema de aire comprimido (cuyo resultado es inmediato), mientras más granulares los datos, tanto mejor, dado que permite reflejar el cambio en el consumo de manera más precisa. Asimismo, datos más frecuentes requieren mayores recursos de procesamiento (tanto humanos como computacionales).

En síntesis, con datos más granulares hay mayores probabilidades de mejorar la precisión, pero requiere mayor esfuerzo, en contraposición a datos menos granulares, los cuales permiten visualizar el panorama más completo, pero en el que se concede precisión. En todos los casos, la granularidad influye en la precisión del sistema. Finalmente, sí se sugiere que la granularidad del consumo de energía y de las variables independientes coincidan, a efectos de establecer la causalidad necesaria.

En relación con el nivel de precisión y exactitud de los modelos, la incertidumbre es una forma de cuantificar precisamente tales atributos. En otras palabras, valoriza el nivel de confianza que se le puede otorgar a los resultados de M&V, reflejando el hecho de que existen limitaciones en la precisión, exactitud, datos y métodos usados. Comunicar la incertidumbre permite a las partes tomar mejores decisiones, de igual manera que si las mismas plantean un nivel de confianza mínimo para los ahorros.

Otras definiciones que ayudan a comprender la extensión de la incertidumbre son:

- Es la falta de conocimiento o información acerca de un evento o resultado en particular.
- Es el grado en que un evento o resultado es desconocido o impredecible.

- Es un atributo que se mide empleando distribuciones de probabilidad, la cual asigna diferentes probabilidades de ocurrencia a distintos escenarios. Esta distribución de probabilidades se la define empleando intervalos de confianza y niveles de confianza requeridos.

En el contexto de M&V, la incertidumbre aleatoria se cuantifica a través de análisis estadísticos, aunque no puede eliminarse por más esfuerzo empleado. Por otra parte, la incertidumbre epistémica es inherentemente desconocida, pero puede ser simulada y estudiada realizando análisis de sensibilidad y viendo cómo influyen las distintas variables según sus probables escenarios y respectivos grados de ocurrencia.

¿Cómo impacta la incertidumbre en la LBE? En líneas generales atenta contra la precisión, lo que provoca que la dispersión de los datos (medida por el desvío estándar) aumente. De esta manera, el valor estimado en el Período de Reporte según la LBE ya no es único: se trata, entonces, de un intervalo, cuyo contenido responde a una distribución de probabilidades en donde el promedio puede ser el valor más probable, pero no el único.

Para medir el nivel de certeza que existe en el modelo que pretende ajustar la muestra de datos se dispone de múltiples herramientas estadísticas:

- R^2 : llamado «coeficiente de determinación», es un parámetro que varía entre 0 y 1 y mide la proporción que explica la variable independiente el consumo de variable dependiente (en este caso, consumo de energía). En otras palabras, tanto R^2 es más cercano a 1, tanto la variable independiente es la causal del consumo de energía. Mientras más alto, la curva propuesta mejor se ajusta a los datos muestrales.
- *MSE*: del inglés *mean squared error*, es el promedio de los cuadrados de la diferencia entre cada par de dato real y valor estimado por la curva (residuos). Se emplea el cuadrado a efectos de que no se compensen entre sí diferencias por exceso y por defecto. Mientras más bajo, más preciso el modelo.
- *RMSE*: del inglés *root mean squared error*, es la raíz cuadrada del *MSE*, deshaciendo la operación aritmética de elevar al cuadrado. En otras palabras, es el desvío estándar del *MSE*. Mientras más cercano a cero, más preciso es el modelo.
- *CV(RMSE)*: es el coeficiente de variación del *RMSE*, calculado como el cociente entre el *RMSE* y su valor medio. Mientras más pequeño, menos dispersos se encuentran los valores respecto del modelo y, por tanto, más precisos. Si entre distintos modelos los R^2 son muy semejantes, aquel que tenga menor *CV(RMSE)* debería ser elegido.
- Gráficos de residuos: son representaciones gráficas del *MSE*.

- R^2 ajustado: ajusta el valor de R^2 al tomar en cuenta el número de variables independientes y el tamaño de la muestra, elementos que no tomaba en su cálculo R^2 . Este valor ajustado siempre es menor que el original y últimamente se emplea más para representar la bondad del ajuste.
- R^2 combinado con $CV(RMSE)$: no refiere a un parámetro estadístico en particular, sino que se recomienda emplear ambos (al menos) para determinar la bondad del modelo.
- Prueba F de Fisher-Snedecor: relacionada fuertemente con el concepto de varianza, esta prueba de hipótesis se emplea para evaluar la significancia estadística global de un modelo de regresión. Cuando el valor de la prueba F es menor a 0.1, se considera que el modelo es estadísticamente significativo.
- Valor p : Un valor p de la muestra que se encuentre por debajo de un nivel de confianza (generalmente 0.1 o 0.05) significa que la variable independiente tiene influencia significativa sobre la dependiente. Técnicamente, esto representa que existe una probabilidad de 90 o 95 % (100 % descontado el nivel de confianza) de que la variable independiente sea significativa.

Así, mientras más de estas herramientas se cumplan, más preciso es el modelo y su incertidumbre, evaluada. Ninguna de estas por sí sola es condición suficiente para garantizar la bondad de ajuste del modelo.

5. Consideraciones estadísticas sobre el Instrumental de medición.

El subcapítulo 6.6 «Planificación para la recopilación de datos de la energía» de la norma ISO 50001:2018 indica que «la organización debe asegurar que el equipo utilizado para la medición de las características más importantes proporcione datos que sean precisos y repetibles». En otras palabras, cuanto menos, demanda calibración de los equipos críticos y/o patrones.

El hecho de calibrar los instrumentos asegura (o aumenta la probabilidad de) que los resultados que registra sean precisos y repetibles. De no ser calibrados, su empleo puede derivar en resultados imprecisos (incorrectos), lo cual aumenta la incertidumbre. Una vez procesados los datos incorrectos, la trazabilidad para encontrar el desvío puede ser difícil, siempre y cuando se haya detectado que el origen de tal desvío estuvo en emplear instrumental no calibrado.

Con el advenimiento de nuevas tecnologías, tanto de medición directa como indirecta de variables relacionadas estrechamente con energía, afortunadamente cada vez existen más laboratorios especializados y certificados que permiten que los instrumentos

registren valores «de calidad estadística»; con ello, también desciende el costo del servicio de calibración. Esta práctica cobra mayor relevancia a medida que el instrumento es más sofisticado (como analizadores de redes) y/o se desea garantizar la precisión del dato puesto que es la principal materia prima de M&V. «¿Cuánta muestra se habrá perdido de medir si se empleó un instrumental no calibrado?» Cada instante en que una variable no es medida, ese dato no es posible de recuperar, lo que disminuye progresivamente el tamaño de la muestra.

Debe prestarse especial énfasis al manual del instrumento y/o al certificado de calibración (luego de algún tiempo de uso) en donde se informa el nivel de precisión del instrumento. Esto no es más que incertidumbre, la cual puede ser puramente aleatoria si está bien calibrado y mantenido y operado en las condiciones del fabricante, o una mezcla con incertidumbre epistémica si el observador además desconoce cómo o qué medir.

Ciertos instrumentos (como termómetros de alcohol) requieren ser conservados bajo determinadas condiciones, sobre todo de temperatura y humedad, por el lapso de validez del certificado. Si bien la norma ISO 50001:2018 no establece una frecuencia de calibración máxima, es la organización la que debe definir cada cuánto realiza esta práctica (para ello puede guiarse con el resultado de la calibración, mas puede ser menos frecuente si las condiciones de preservación se respetaron).

Buenas prácticas para reducir la incertidumbre en las mediciones son⁴:

- Asegurarse que todos los equipos de medición estén calibrados y mantenidos en las condiciones indicadas.
- Emplear sensores e instrumentos con un alto nivel de precisión y exactitud.
- Cuando sea posible, usar medidores de lectura automática o sistemas de telemedición.
- Implementar mecanismos de validación y control de calidad de datos para identificar y corregir cualquier error o valores atípicos (outliers) en los registros.
- Usar protocolos de comunicación de datos seguros y confiables (con respaldos ya sea en Intranet, servidores y/o nubes) para asegurar frecuencia y granularidad.
- Asegurarse que los datos recolectados sean accesibles por quienes deban acceder y editables por quienes deban hacerlo.

⁴ El subcapítulo 7.5 «Control de la información documentada» de ISO 50001:2018 proporciona los requisitos que debe tener un SGE en relación con este aspecto.

- Usar métodos de cálculo y algoritmo estandarizados para mantener consistencia en el procesamiento de los registros. Asimismo, documentar todo paso para asegurar transparencia es altamente recomendado.

