



# Medidores Inteligentes

Distorsiones en las lecturas de consumo.

## Autor

Rafael Torres M.

Email: [rtorres@bcn.cl](mailto:rtorres@bcn.cl)

Tel.: (56) 32 226 3912

## Colaboradora

Virginie Loiseau

Email: [vloiseau@bcn.cl](mailto:vloiseau@bcn.cl)

Tel.: (56) 22701882

Nº SUP:

## Resumen

Los medidores inteligentes fueron introducidos en las políticas energéticas de Chile el año 2012 con la promulgación de la Ley 20.5711: “Regula el pago de las tarifas eléctricas de las generadoras residenciales”. Se espera que, al año 2025 habrá más de 6 millones de medidores inteligentes instalados en hogares oficinas e industrias, con una inversión de US\$1.000 millones pagada por los consumidores. Enel ya ha instalado 250 mil nuevos medidores en Santiago, pese a que no existe aún la norma técnica que deben satisfacer.

Un estudio realizado en Holanda sobre lecturas erróneas en algunos modelos de medidores inteligentes, a la que se ha contrapuesto un estudio de la Universidad de Santiago que concluye que no hay errores de lectura en tres modelos de medidores inteligentes probados con –lo que se supone caracteriza- una carga representativa de los hogares chilenos. Las metodologías y protocolos experimentales utilizados, sin embargo, son suficientemente diferentes como para no dar cabida a una comparación de resultados para zanjar la controversia.

De hecho, un análisis de las metodologías y objetivos de ambos estudios permite concluir que no son comparables y que el reemplazo de medidores tradicionales por medidores inteligentes no es un simple proceso de quita y pon.

Sumado a lo anterior, es evidente del estudio holandés que, las severas divergencias de los resultados son atribuibles al diseño de los medidores, junto con el uso creciente de dispositivos con fuentes de poder conmutadas, que alteran la perfecta onda sinusoidal de voltaje de la red e introducen patrones de ondas mucho más complejos e irregulares, incluso erráticos; y –aparentemente- los medidores modernos de energía no han considerado estos factores.

Es evidente entonces, que los instrumentos de medición –particularmente la elección del sensor analógico incorporado-, deben satisfacer exigentes normas técnicas. Será necesario también caracterizar las cargas representativas de hogares, servicios e industrias, en nuestro país, ya que el estudio holandés pone especial énfasis en las características de las cargas, puesto son críticas para la precisión de las mediciones en diferentes tipos de medidores según el sensor que utilicen.

---

<sup>1</sup> “Ley 20571. Regula el pago de las tarifas eléctricas de las generadoras residenciales”. Disponible en: <https://www.leychile.cl/navegar?idNorma=1038211>. (Marzo 2019).

## Introducción

---

La Ley 20.571 –de acuerdo a su resumen- “*Modifica el DFL N° 4 del 2007, Ley General de Servicios eléctricos, en materia de Energía eléctrica, que fija el texto refundido, coordinado y sistematizado del decreto con fuerza de ley N° 1, del Ministerio de Minería, de 1982, Ley General de Servicios Eléctricos, en lo referente al pago de las tarifas de las generadoras residenciales y establece descuentos y reembolsos en la facturación, si proceden*”. Estos descuentos provendrían de inyecciones de excedentes de energía, que los clientes con sistemas de generación domiciliarios en base a Energías Renovables No Convencionales (ERNC), podrían eventualmente realizar. Esta modificación implica necesariamente la introducción de sistemas bidireccionales de lectura de corriente domiciliaria, es decir, los llamados Medidores Inteligentes (*Smart Meters*).

Posteriormente, la Ley 21.076<sup>2</sup> establece que los medidores y empalmes domiciliarios dejan de ser propiedad de los clientes y pasan a ser propiedad y responsabilidad de las empresas de distribución de electricidad y que “*Los decretos tarifarios a que se refieren los artículos 120, 184 y 190, o el que los reemplace, determinarán la forma de incluir en sus fórmulas tarifarias la remuneración de estas instalaciones, así como las condiciones de aplicación de las tarifas asociadas a ellas*”, habilitando a las empresas distribuidoras para instalar nuevos empalmes y medidores de su propiedad, y cobrar a los usuarios los costos de instalación.

Según la información publicada por CIPER<sup>3</sup>, al año 2025 habrá más de 6 millones de medidores inteligentes instalados en hogares oficinas e industrias, con una inversión de US\$1.000 millones pagada por los consumidores. Enel ya ha instalado 250 mil nuevos medidores en Santiago, pese a que no existe aún la norma técnica que deben cumplir.

Es precisamente en este punto que se ha instalado una polémica no trivial, puesto que hay evidencia que distintos modelos de *Smart Meters* arrojan distintas lecturas para un mismo consumo<sup>4</sup>.

## Medidores y Medidores Inteligentes

---

Desde los comienzos del uso de la energía eléctrica en nuestro país, su consumo se ha registrado mediante un pequeño motor eléctrico -conectado en serie<sup>5</sup> con el cable principal que alimenta de electricidad al cliente (hogar, industria o servicio)- cuya velocidad de rotación es proporcional a la intensidad de la corriente eléctrica que fluye<sup>6</sup>. El eje de rotación, a su vez, hace girar una serie de engranajes cada uno en relación 10:1 en relación con el anterior (diez revoluciones de uno corresponden a una revolución del siguiente), cada engranaje tiene grabados los primeros diez dígitos y juntos

<sup>2</sup> “Ley 21076. Modifica la ley general de servicios eléctricos para imponer a la empresa distribuidora de energía la obligación de solventar el retiro y reposición del empalme y medidor en caso de inutilización de las instalaciones por fuerza mayor”. Disponible en: <https://www.leychile.cl/navegar?idNorma=1115627>. (Marzo 2019).

<sup>3</sup> “Instalarán nuevos “medidores inteligentes” de electricidad: el costo de US\$1.000 millones será asumido por clientes”. Disponible en: <https://ciperchile.cl/2019/03/01/instalaran-nuevos-medidores-inteligentes-de-electricidad-el-costo-de-us1-000-millones-sera-asumido-por-clientes/>. (Marzo 2019).

<sup>4</sup> University of Twente Enschede, The Netherlands. “*Static energy meter errors caused by conducted electromagnetic interference*”. Abstract disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7866234>. Marzo 2019.

<sup>5</sup> Dos dispositivos eléctricos están conectados en serie si y sólo si toda la corriente que pasa por uno, necesariamente pasa por el otro. La conexión en paralelo, por otra parte, es aquella en que la corriente total se divide entre los dispositivos conectados, en proporción inversa a la resistencia eléctrica de cada uno de ellos. *N. del A.*

<sup>6</sup> Suponiendo que el voltaje RMS ( $V_{RMS}$ ) no sufre variaciones. El  $V_{RMS}$  es un promedio, utilizado para caracterizar un potencial eléctrico variable. En Chile, el voltaje varía entre +380 y -380 volts, 50 veces por segundo, según una función sinusoidal. El  $V_{RMS}$  en nuestro país es 220 V.

despliegan, en número de KWh's, la energía consumida<sup>7</sup>, Así, el medidor clásico, es un pequeño computador analógico.

Los “Medidores Inteligentes” por su parte, no tienen partes móviles –por eso son también llamados “Medidores Estáticos”- y aparte de sus capacidades primarias de medir consumo de energía, tienen una amplia variedad de funciones y actuadores para comunicarse entre sí, con la empresa, con los clientes y conectar o desconectar tanto a clientes como a interruptores en varias partes del trazado de manera remota; es decir, aprovechar todas las oportunidades de la Internet tradicional y la Internet de las cosas. Lamentablemente, también sujeta a las debilidades y vulnerabilidades de éstas.

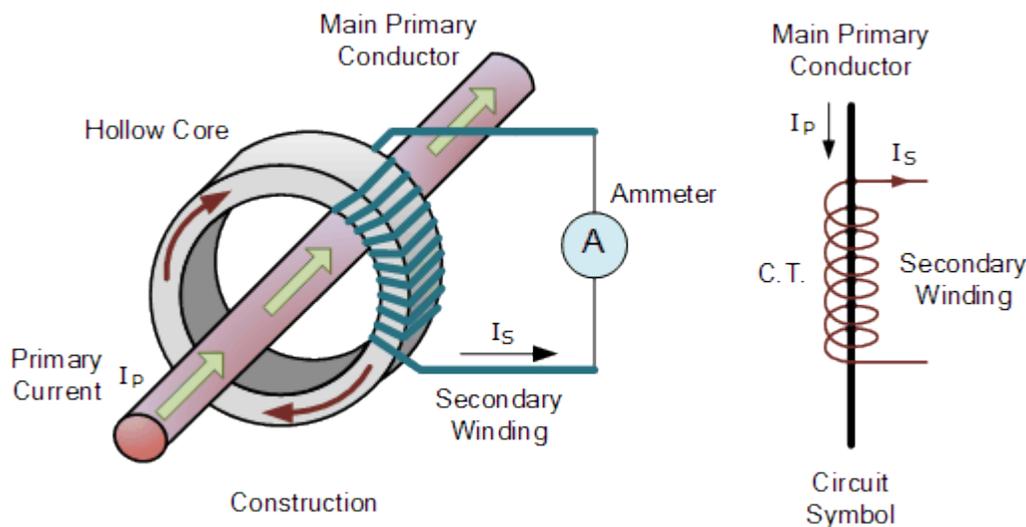
## ¿Cómo y qué miden los medidores inteligentes?

### ❖ Sensores (transductores)

Esta sección es absolutamente crucial para el funcionamiento correcto del medidor porque, como se señaló anteriormente, su propósito es obtener una representación fiel del consumo de energía en el circuito bajo medición, es decir obtener una señal isomorfa al consumo. Para lograrlo, es necesario usar un “sensor” o transductor que convierte un tipo de señal eléctrica en una de otro tipo, que replica fielmente las variaciones de la señal original. En el caso de los medidores tradicionales, la transducción era desde intensidad de corriente a velocidad de rotación (velocidad angular) de un volante (un disco) que era visible desde el exterior. Los medidores inteligentes, en cambio, utilizan uno de cuatro tipos de transductores:

1. **Transformador de corriente (Fig.1).**- Es un anillo sobre el que se bobina un conductor y por cuyo eje pasa un conductor de corriente. Por inducción electromagnética se produce una corriente proporcional en el bobinado sobre el anillo. Conociendo el factor de proporcionalidad, este valor de intensidad de corriente es utilizado para determinar la corriente que circula por el cable de alimentación principal de la instalación.

Figura 1.- Transformador de corriente



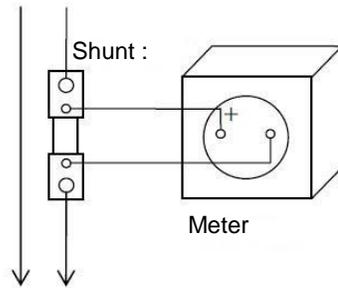
2. **Shunt<sup>8</sup>**, resistencia en serie con el cable de alimentación principal (Figura 2).- Es una resistencia de valor R bajo (en Ohms), de alta precisión y de bajo coeficiente de temperatura.

<sup>7</sup> El algoritmo de transformación está dado por las relaciones entre los diámetros de los respectivos engranajes y el diseño de los parámetros eléctricos del motor.

<sup>8</sup> Resistencia de bajo valor en serie con el cable de alimentación principal

Se mide la diferencia de potencial en los extremos de la resistencia, que es proporcional a la corriente  $V_s = R_s I$ .

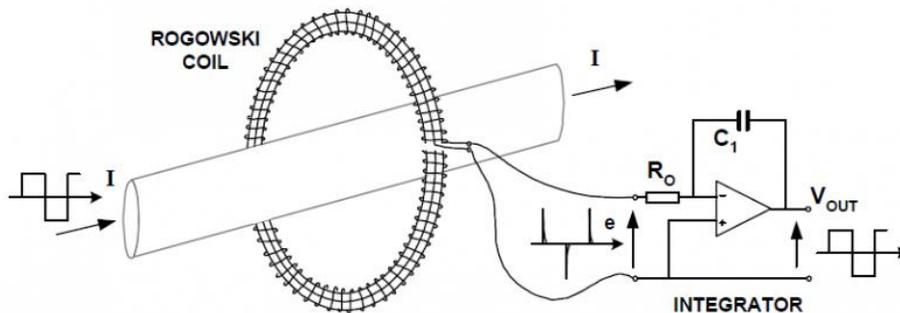
Figura 2.- Shunt



Fuente: "Current Measurements Using Shunt".

3. **Bobina de Rogowski<sup>9</sup>**.- Es un conductor eléctrico (alambre) bobinado como "toroide"<sup>10</sup>, por cuyo centro pasa un cable conductor de la corriente eléctrica alterna. La señal inducida en la bobina es un voltaje, que es proporcional a **la variación de la corriente**, que pasa por el cable. Esta señal luego es dirigida a la entrada de un "integrador analógico", como se muestra en la Fig. 1b, que produce un voltaje que es isomorfo con la corriente, tanto en amplitud, como en frecuencia.

Figura 3:- Bobina de Rogowski



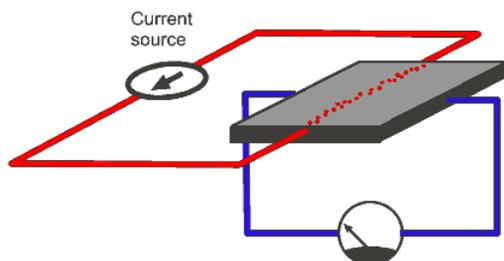
Fuente: What is a Rowoski Coil Current Probe?

En la figura 3 se observa que la salida de la bobina se conecta a la entrada de un circuito cuya salida es una representación en voltaje, isomorfa a la corriente que fluye por el cable.

4. **Sensor de Efecto Hall** (Figura 4).- Es un sistema constituido por un conductor de corriente, un campo magnético intenso y estable y un voltímetro de alta precisión y alta resolución. Cuando cargas eléctricas en movimiento se encuentran en un campo magnético sufren una desviación de su trayectoria, perpendicular al campo magnético y a su velocidad, cuyo sentido depende de su carga (+ o -), una opuesta a la otra. Por tanto, entre dos lados del conductor se produce una diferencia de potencial eléctrico (voltaje) proporcional a la intensidad de la corriente.

<sup>9</sup> "What is a Rowoski Coil Current Probe?" Disponible en: <https://www.rs-online.com/designspark/what-is-a-rogowski-coil-current-probe>. Marzo 2019.

<sup>10</sup> Para tener una representación mental de un toroide, imagine un alambre de cobre esmaltado (en lugar de plástico aislador), enrollado con espiras contiguas sobre un cilindro hueco, flexible y no conductor. A continuación, doble los extremos del cilindro formando un círculo, hasta que ambos extremos se encuentren. Tendrá entonces una bobina toroidal o "toroide".



**Figura 4.- Efecto Hall** (pulsar Control+Click para ir a animación)

Fuente: Sensor de campos magnéticos, sensor Hall<sup>11</sup>.

### ❖ Sección Digital

Esta sección es la encargada de llevar a cabo todas las promesas realizadas en relación a los medidores inteligentes, tanto en lo relativo al despliegue de los datos al usuario, como en lo que respecta a comunicaciones desde y hacia múltiples destinos, ejecutarán algoritmos y realizarán acciones a través de actuadores electromecánicos o eléctricos o electrónicos. Valga esta sola mención en consideración a la brevedad y foco del presente informe, aunque el tema merece un informe completo a él dedicado.

## Efectos del sensor sobre la precisión y fidelidad de las mediciones.

En nuestro país, se ha instalado una controversia sobre la precisión y fidelidad de las lecturas efectuadas por los medidores inteligentes versus los medidores tradicionales. Por una parte, se citan los resultados de un estudio realizado por el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Santiago (USACH)<sup>12</sup> y por otra, aquellos realizados por la Universidad de Twente Scheden en Holanda. Los resultados avalan ambas posturas, sin que se incurra en contradicción alguna.

### ➤ **Estudio realizado por la Facultad de Ingeniería de la USACH**

El estudio, según lo informado por la Facultad, “realizó una serie de pruebas de medición de consumos de diferentes artefactos eléctricos representativos de un hogar tipo, constatando que estos aparatos registran los mismos consumos que uno convencional.

Las pruebas realizadas consideraron situaciones comunes y representativas de un consumo residencial”. Se midió el consumo de varios artefactos eléctricos representativos del consumo de un hogar típico (un calefactor, un refrigerador, un computador, una lámpara, un hervidor, un conjunto de ampolletas de ahorro, y un cargador de celular) durante varias horas. Estas mediciones se realizaron en una muestra de tres medidores inteligentes y dos convencionales.

El Dr. Humberto Verdejo Director del laboratorio mencionado manifestó que “las pruebas realizadas por nuestro laboratorio muestran que los medidores inteligentes capturan el consumo

<sup>11</sup> “Sensor de campos magnéticos, sensor Hall”. Disponible en: [https://www.google.com/search?q=efecto+hall+sensor&rlz=1C1AVFC\\_enCL820CL820&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwji\\_fu3jqPhAhVUHrkGHTAgAI0Q\\_AUIDigB&biw=1366&bih=576#imgdii=\\_YEQTcgTepJeTM:&imgrc=HCXD5nGz82hcGM](https://www.google.com/search?q=efecto+hall+sensor&rlz=1C1AVFC_enCL820CL820&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwji_fu3jqPhAhVUHrkGHTAgAI0Q_AUIDigB&biw=1366&bih=576#imgdii=_YEQTcgTepJeTM:&imgrc=HCXD5nGz82hcGM). (Marzo 2019).

<sup>12</sup> SINETEC. “Medidores inteligentes: USACH comprobó en estudio que miden lo mismo que los convencionales”. Disponible en: <https://www.sinetec.cl/2019/03/08/medidores-inteligentes-usach/>. (Marzo 2019).

de la misma forma que lo realizan los medidores convencionales. No se detectaron desviaciones que pudiesen provocar mediciones erradas.

En las condiciones simuladas, se verificó que los valores medidos por ambas tecnologías resultan ser razonablemente similares. Para efectos de los clientes, basado en las mediciones que nuestro laboratorio realizó, significa que con un medidor inteligente sólo medirá y cobrará la energía consumida por su hogar”.

Además, el Dr. Verdugo entregó las siguientes conclusiones del trabajo:

- Las pruebas realizadas, considerando situaciones comunes de un consumo residencial, muestran que los medidores inteligentes no arrojan mediciones de energía diferentes a las que se pueden obtener con medidores convencionales.
- Cabe mencionar, que esta prueba contempló un trabajo de dos jornadas en donde se preparó el laboratorio técnico para simular un consumo domiciliario con electrodomésticos de uso masivo incorporando medidores de disco, digitales e inteligentes, con mediciones cada 15 minutos, intervalo de tiempo en el cual los medidores inteligentes miden y almacenan variables de consumo de energía y otros datos sobre calidad de servicio y producto a efectos de monitorear permanentemente la red, en donde no se presentaron distorsiones significativas entre unos y otros dispositivos.

Hasta aquí la información recopilada en diversos medios de prensa. Lamentablemente, no ha sido posible contactarse con el Dr. Verdugo para inquirir detalles sobre el protocolo experimental. Saber por ejemplo, si la carga del circuito medido fue siempre la misma o si se alternaron períodos de encendido y apagado de los diversos artefactos, los que producen transientes que –en la forma de potenciales eléctricos- se transmiten por los conductores, así como variaciones de la carga por dimmers<sup>13</sup> u otros dispositivos (como reguladores de voltaje o fuentes de alimentación que utilizan técnicas de switching<sup>14</sup>).

Tampoco ha sido posible saber qué tipo de transductores tenían los medidores inteligentes utilizados, información que como se verá a continuación es importante para discusión en curso.

#### ➤ **Estudio realizado en la Universidad de Twente Scheden<sup>15</sup>(UT), Holanda**

El estudio realizado por esta universidad, si bien compartía el objetivo de la investigación realizada en Chile, utilizó un protocolo diferente. En primer lugar, usó cargas que incluyeron un amplio rango de electrodomésticos y *dimmers*, que se conectaron –vía un panel de distribución eléctrico- a nueve medidores electrónicos fabricados entre 2004 y 2014. Los resultados de las mediciones se compararon con el consumo real determinado en forma independiente.

#### ○ **Resultados**

En los experimentos (todos enteramente reproducibles), cinco de los nueve medidores arrojaron lecturas significativamente más altas que el consumo real. En algunas configuraciones de carga se obtuvieron lecturas superiores (hasta un 586%), y en otras –por el contrario- dos medidores arrojaron lecturas un 30% menor que el consumo real.

Las mayores desviaciones de lecturas ocurrieron cuando se utilizaron cargas que incluyeron *dimmers* combinados con ampollitas fluorescentes (de ahorro de energía) y focos LED; sin sobrepasar las cargas de un hogar típico.

<sup>13</sup> Dispositivos para controlar la intensidad de la luz en lámparas LED, o fluorescentes económicas

<sup>14</sup> Switching: Interrupción abrupta de la onda de voltaje, que provoca una caída similar en la corriente que –a su vez- produce voltajes por autoinducción en los conductores.

<sup>15</sup> Op.Cit. “Static energy meter errors caused by conducted electromagnetic interference”.

○ **Análisis de resultados**

Las severas divergencias de los resultados son atribuidas al diseño de los medidores, junto con el uso creciente de dispositivos con fuentes de poder conmutadas –generalmente más eficientes– que, en lugar de usar directamente el voltaje de 50 ciclos de la red, lo utilizan para producir voltajes de frecuencias mucho mayores, que necesitan componentes electrónicos más pequeños y económicos para entregar la misma potencia. La contrapartida es que se pierde la perfecta onda sinusoidal de voltaje de la red y se introducen patrones de ondas mucho más complejos e irregulares, incluso erráticos; y los diseñadores de los modernos medidores de energía no han considerado las cargas con fuentes de poder conmutadas.

Un “*estudio forense*”<sup>16</sup> de los medidores inteligentes utilizados, reveló que aquellos asociados a lecturas excesivas eran aquellos cuyo sensor era la “Bobina Rowoski”, mientras que aquellos que arrojaban lecturas demasiado bajas eran aquellos con sensor de “Efecto Hall”. Al respecto, Frank Leferink, (Profesor de Compatibilidad Electromagnética de la UT) señaló que: “*Los medidores de energía evaluados satisfacen todos los requerimientos legales y están certificados. Estos requerimientos, sin embargo, no han sido diseñados para medir el consumo de los dispositivos conmutados modernos*”.

○ **Hipótesis**

La más probable causa de los errores observados radica en la elección del sensor utilizado para medir la corriente y la electrónica a él asociada. El comportamiento de los cuatro sensores anteriormente mencionados, en relación a los transientes y frecuencias asociados a dispositivos conmutados es:

- Shunt (o resistencia): Se mide el potencial que se desarrolla entre sus extremos y es el menos sensible a los problemas que afectan a los medidores inteligentes.
- Transformador de corriente: Los transientes con frecuencias de hasta 10 KHz serán registrados con precisión; a más altas frecuencias se producirán errores de lectura. Se pueden producir errores adicionales asociados a la electrónica de captura procesamiento de datos si no han sido diseñado para trabajar en rangos altos de las componentes de frecuencia y amplitud de los transientes.
- Sensor de Efecto Hall: Las lecturas registradas son consistentemente menores que las lecturas de referencia, has ahora, sin embargo, no ha sido posible encontrar una explicación para estos resultados.
- Dispositivo Rogowski: consta de una bobina Rogowski y un circuito integrador. La bobina puede medir con precisión transientes de alta frecuencia, pero cuando el integrador está diseñado para bajas frecuencias, los transientes rápidos (de alta frecuencia) tienden a saturar el integrador y provocar severos errores de lectura.
- Otros problemas: El uso creciente de equipamiento conmutado, como dimmers, VFDs<sup>17</sup> y luces LED y generadores de respaldo en edificios y viviendas

<sup>16</sup> Estudio forense: es aquel enfocado en el reconocimiento, identificación y evaluación de la evidencia física.

<sup>17</sup> Un VFD (Variable Frequency Drive) es un dispositivo de control de motores trifásicos que controla su velocidad a través del control de la frecuencia y la amplitud del voltaje que los energiza.

## Por tanto

---

- Es evidente que la polémica desatada por la comparación de los datos obtenidos por el Dr. Verdugo en los laboratorios de la USACH, y aquellos obtenidos en Holanda por el equipo de Dr. Leferink, carece de sentido, porque se están comparando estudios con objetivos y protocolos experimentales distintos.
- Por otra parte, pone de manifiesto que la introducción de medidores inteligentes no involucra un simple recambio, sino que requiere un cuidadoso estudio de las características de los distintos modelos de medidores en el mercado, porque no todos son confiables en un mercado eléctrico en el que la naturaleza de las cargas características, en distintos segmentos de la población, está evolucionando con una velocidad que no ha sido caracterizada. Lo que podría implicar un mayor número de lecturas erróneas en el futuro.
- La norma técnica chilena para los medidores inteligentes debe considerar factores hasta ahora no considerados en la norma nacional en lo referente a la medición del consumo eléctrico, tanto en la selección del sensor de corriente, como en la variación en curso de la carga característica de distintos sectores de la economía con la introducción de sistemas conmutados, según ha puesto de manifiesto el trabajo de la UT.