



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Tecnologías de monitorización en
sistemas de distribución de energía
y servicios asociados en TIC'S**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero en Telecomunicaciones

P R E S E N T A

Carlos Alberto Violante De Santos

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Damián Federico Vargas Sandoval



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

Índice General

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Motivación y justificación del presente.....	1
1.2 Trasfondo histórico.....	3
1.3 Objetivo de la presente tesis.....	6
Capítulo 2: Contexto Histórico y Social.....	8
2.1 En el mundo.....	12
2.2 En México.....	21
2.3 Importancia de la calidad y aprovechamiento de los servicios.....	27
Capítulo 3: Casos de Estudio.....	30
3.1 NILM (Monitorización No Intrusiva de Cargas).....	30
3.1.1 Antecedentes y principios.....	31
3.1.2 Aplicaciones.....	40
3.1.3 Caso California.....	50
3.1.4 Caso USC.....	53
3.2 Smart Grids & IoT.....	58
3.2.1 Conceptos y teoría.....	59
3.2.2 Convergencia de Smart Grids con NILM, IoT.....	62
3.2.3 Actualidad.....	67
3.3 Medición de la calidad de servicio (QoS) en banda ancha fija y móvil.....	70
3.3.1 Casos en el mundo.....	76
3.3.2 Datos masivos (Big Data).....	80
Capítulo 4: Conclusiones.....	82
Apéndice.....	87

Índice de Figuras

Figura 3-1 Triángulos de impedancia y potencia	34
Figura 3-2. Cargas lineales y no lineales.....	37
Figura 3-3. Efectos de los armónicos	37
Figura 3-4. Ondas de armónicas, incluyendo la 3 ^a	39
Figura 3-5. Con fines informativos y complementarios, se muestran los voltajes y frecuencias operativas en el mundo.....	42
Figura 3-6. Clasificación de firmas según George Hart.	44
Figura 3-7. Disposición típica para ejecución de NILM en varias cargas. La adquisición de datos y el procesamiento ocurre en la locación central.	46
Figura 3-8 Diagrama de bloques de los procesamientos típicos en la mayoría de implementaciones de NILM, nótese como la etapa de diagnóstico de falla se alimenta con frecuencia de etapas previas.	47
Figura 3-9 Diagrama esquemático de los autores del dataset REDD.....	55
Figura 3-10. Esquemático conceptual de SG.....	58
Figura 3-11. IoT por su implementación.....	62
Figura 3-12. Contraste de medidores clásicos contra inteligentes.....	63
Figura 3-13. Ejemplo de un Smart meter de Texas Instruments que soporta diversas opciones de conectividad.....	64
Figura 3-14. Conectividad basada en SG habilitando servicios inteligentes domésticos basados en IoT	66
Figura 3-15. Vista general de los diversos aspectos en el proceso de recolección de datos con NILM	67
Figura 3-16. Fuente: GSMA.....	68
Figura 3-17. Fuente: GSMA.....	69
Figura 3-18. Tráfico móvil en América Latina, en <i>petabytes</i> mensuales.	71
Figura 3-18. Relación entre la regulación respecto a la calidad del servicio (QoS) y el número de usuarios, de acuerdo a GSMA.	73
Figura 3-19. Infografía sobre el incremento de conexiones.	74
Figura 3-20. Flujo de trabajo de medición de la calidad de redes móviles.	75
Figura 3-21. Presentación de la plataforma Speedtest de Ookla.	77
Figura 3-22	78
Figura 3-23	78
Figura 3-24. Resumen del reporte sobre México de Open Signal.....	79
Figura 3-25. Reconocimiento general de Open Signal a los operadores móviles en México.	79
Figura 4-1.	82

A mis padres, Elvira y Alberto

A mi hermana, que no me ha dejado de tratar de sacar adelante en los momentos difíciles

A mis maestros, que me impartieron su conocimiento y experiencia

A la UNAM, por darme la formación que me ha permitido vivir grandes experiencias académicas y laborales

A USC, por creer en mí para poder participar en el proyecto y a la Universidad de Carnegie Mellon por el apoyo.

A mis amigos y a todo GGM por hacerme reír cuando lo necesitaba y hacer la vida más llevadera.

A mis superiores que apoyaron mis intentos de poder terminar ésta tesis.

A Dios y Santa Teresa de Jesús, por no abandonarme

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación y justificación del presente

En los últimos años hemos vivido un incremento notable en la investigación y desarrollo en el campo de las comunicaciones, esto ha rendido frutos especialmente cuando nos referimos a cuestiones para recolección, movimiento e intercambio de información. Ejemplos claros de esto yacen en Internet, Wi-Fi, Bluetooth, las varias redes celulares y las comunicaciones por satélite, y también con las tecnologías del Internet de las Cosas (*Internet of Things*, IoT) y la gran cantidad de datos útiles que se generan, que se pueden manejar y procesar en esquemas de *Big Data* (datos masivos, es decir, grandes cantidades de información).

Todo esto converge de algún modo en nuevo conocimiento, nuevos desarrollos y nuevas aplicaciones para la mejora en el estilo y la calidad de vida del ser humano. Sin embargo, aunque esta es la tendencia, los procesos de recolección y análisis de datos no siempre son económicamente accesibles y para cierto tipo de aplicaciones, todavía quedan cosas que mejorar en este rubro.

Una muestra de ello es que, aunque ya existen hogares y edificios inteligentes en varias partes del mundo, esto no es una realidad masificada, es decir, sólo algunos tienen acceso a este tipo de infraestructuras. Entiéndase por un inmueble *inteligente* aquel en el que se implementó desde su construcción una red de sensores conectados a un colector de datos (típicamente una base de datos) en el que se permite el control de varios aspectos de este inmueble, con la intención de automatizar y permitir la toma de decisiones en función de parámetros *a priori*, que son reconfigurables en cualquier momento.

No solo se ha buscado que la vida y el día a día del ser humano sean más cómodos, sino que también hay un aspecto **ecológico y económico**. Ecológico porque, como se describirá más adelante, las auditorías de energía

forman una parte importante en la **regulación energética** y esta es un área aún perfectible. Económico porque a nadie le gusta perder dinero, y estamos generalmente abiertos a cualquier proceso o tecnología que nos permita ahorrarlo.

Hemos desarrollado grandes núcleos urbanos que dependen de grandes cantidades de energía para el desarrollo de múltiples tareas que ya no podríamos concebirnos sin ellas, asumiéndonos como sociedad moderna industrializada. El manejo de energía y control de aparatos para edificios residenciales y comerciales se vuelve verdaderamente importante. Sin embargo, se ha llegado a un punto donde la gran mayoría de las personas tienen una actitud pasiva ante las repercusiones de lo que puede significar un consumo desmesurado o mal regulado.

Algo que se puede agregar a lo recién mencionado, y que podría surgir como una pregunta interesante es ¿Cómo se han adaptado las edificaciones viejas a las demandas energéticas del siglo XXI? ¿Qué requerimientos deben cumplir las nuevas edificaciones para ser energéticamente funcionales? ¿Qué tan importante es su papel en un esquema ecológico-económico? Es inevitable –y obligada- presentar esta relación que existe desde que el hombre empezó a vincular los conceptos de suministro de energía con edificaciones sustentables. Como se verá más adelante, existe un proceso llamado **auditoría de edificaciones** en el que se evalúa su calidad de operación, de acuerdo con expectativas definidas *a priori*. Estos procesos van muy de la mano con otro acto de supervisión conocido como **auditoría energética**, la cual también será explicada y tratada en el contenido de esta tesis.

En materia de energía, la eléctrica ha estado con nosotros desde el día que nacimos. Todos los días podemos encontrar cientos de entradas de corriente alterna (AC) en la pared, cargadores para celulares, laptops, etc. Es intrínseco a nuestras vidas y nuestras actividades cotidianas y es sin duda uno de los cimientos de lo que somos hoy como una sociedad de la información y una que es moderna e industrializada. Cabe entonces, hablar de cómo se encuentra el panorama eléctrico, hoy en día en nuestro país, México, tocando obligadamente los aspectos de **desregulación, sistemas de potencia autónomos y calidad en la potencia entregada**.

Seguramente resulta sencillo intuir que la **educación** también tiene que ver en las formas en cómo la sociedad se relaciona con la energía, ya sea en su **generación, distribución y consumo**. El fin a lograr recae en volvernos una sociedad educada en materia de energías, con hábitos de consumo responsables y conscientes, y que además tienen comprensión del contexto en el que vive y las consecuencias en los ámbitos personal y global que puede tener el no aplicar ni convivir con un correcto marco regulatorio sin hábitos útiles para este propósito.

1.2 Trasfondo histórico

El ser humano se ha visto en la necesidad de transformar su entorno y los recursos en él para la obtención de energía, la cual ha aplicado para el continuo modelado de la sociedad y los alrededores de la misma. Así, recursos como el agua, el gas, la electricidad, el petróleo, etc. han sido objeto de estudio de empresas y académicos, para mejorar la calidad de los procesos que involucran, su aprovechamiento y reducir el impacto ambiental. La preocupación generalizada acerca del cambio climático global ha motivado los esfuerzos para reducir las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero (llamados en inglés, *Green House Gases* - GHG). La energía usada en el sector residencial contribuye significativamente en materia de GHG, por ejemplo, el sector residencial es responsable de casi un tercio de la electricidad usada sobre los hábitos de consumo en EE.U.U. Aun cuando hay información disponible sobre los hábitos de consumo en una casa típica, ésta no ha permitido a la mayoría de los dueños el reducir su consumo.¹ Téngase en cuenta que un calentador de ambiente, un enfriador, calentador de agua y alumbrado es casi el 50 por ciento de todo el uso residencial.² Existen varios grupos de investigación en el mundo tratando de desarrollar técnicas de medición barata para agua, gas y electricidad, fácil de instalar, capaces de proveer desagregación.

También está presente un miedo latente al hecho de tener que incrementar los costos, así como también ha incrementado la preocupación acerca del cambio climático; todo esto ha motivado a levantar esfuerzos para la conservación de energía residencial. Reducir el consumo de energía y cortar costos es un problema importante hoy en día que afecta a todos. En

¹ U. E. I. Administration. Electric power annual 2008. <http://www.eia.doe.gov/cneaf/electricity/epa/epaxlfilees1.pdf>, 2010.

² U. E. I. Administration. Electricity faq. http://www.eia.doe.gov/ask/electricity_faqs.asp, 2010.

ambientes residenciales ahorrar en electricidad puede ser difícil porque el usuario suele carecer de un esquema de referencia de cuánto consumen los aparatos que usan, cuáles de sus funciones son las que más consumen recursos, o siquiera cual es el consumo global de todos ellos

Los sistemas eléctricos pueden ser encontrados donde sea. Sistemas que van desde los satélites a aparatos del hogar, dependen de actuadores, controles y fuentes de energía que comúnmente son de naturaleza electromecánica. Conforme estos sistemas se vuelven más complejos, una forma de manejar esta complejidad es la observación de eventos físicos diferentes entre sí que puedan ser asociados con patrones de consumo de energía, de forma que se analicen, se registren y así, se puedan hacer inferencias sobre el estado del sistema.

Han existido eventos donde se han mostrado algunos de los esfuerzos antes mencionados, como el foro mundial United Nations Conference on Environment and Development, UNCED³, que tuvo lugar en 1992 en la ciudad de Río de Janeiro, Brasil. Se trataron temas acerca de alternativas energéticas para reemplazar combustibles fósiles y la escasez de agua. Se trató de replantear los objetivos globales en materia de una armonización entre lo económico y lo ambiental. En ese entonces, se afirmaba que la humanidad no estaba lista para asumir el rol de contribuir en un mayor nivel de sustentabilidad de recursos. El ser humano promedio no logra dimensionar como afecta al ambiente su uso diario de electrodomésticos, y este es el fundamento de la tecnología que pretende reducir el impacto ambiental. En junio de 2012, tuvo lugar una nueva reunión internacional, donde se trataron los mismos temas, aunados a otros de trato necesario pues así se han presentado en los últimos años. En general, se apela a desarrollar una sociedad sustentable, asegurarse del progreso de proyectos y puntualizar los retos y problemas que han venido surgiendo.⁴

Es por eso que el esquema ambiental actual debe verse con más cuidado: el cambio climático es real y los combustibles fósiles cada vez están más cerca de agotarse lo que hace tiempo nos llevó a pensar que deberíamos reformular la manera en cómo tratamos nuestras necesidades energéticas. Hay reportes con estadísticas relevantes acerca de cómo en Estados Unidos el 40 por ciento del

³ <http://www.un.org/esa/earthsummit/>

⁴ <http://www.cipamericas.org/archives/7690>

consumo primario de energía, fue para generar electricidad, y 68 por ciento se pierde durante los procesos de generación y distribución. Ahorrar en esta cuestión, no solo beneficiaría a unos cuantos individuos, sino potencialmente a una nación entera.⁵

Como puede verse, existe una cantidad de retos que sobrellevar, que se irán tratando a lo largo de esta tesis, en sus respectivos capítulos. Es innegable que vivimos una nueva era, la era de la sociedad de la información, de hecho, es muy probable que en su hogar existan al menos uno o dos dispositivos que se conectan a la nube. Con esta premisa, el *boom* de las comunicaciones es innegable. Las acciones de investigación y desarrollo han tenido logros avanzados para la comunión, movimiento e intercambio de información, como un aspecto de la vida diaria. Ejemplos de ello son Internet, Bluetooth y las redes IEEE 802.11b, comunicaciones celulares de cuarta y quinta generación, y comunicaciones satelitales. Sin embargo, el proceso de recolectarla, procesarla y analizarla sigue siendo caro para varias aplicaciones; por ejemplo, un administrador de un edificio podría configurar un celular para monitorear el uso de energía y el periodo de operación de una planta de HVAC (*Heating, ventilation and air conditioning* –calefacción, ventilación y aire acondicionado, por sus siglas en inglés) pero generalmente la utilidad de la información será directamente proporcional a la complejidad y tamaño del arreglo de sensores que se van instalando. Se puede extrapolar esto al caso de medición de calidad de servicios de banda ancha fija y móvil, y la cantidad de datos se vuelve intimidante, debido a la gran cantidad de usuarios y el tamaño de la muestra estadística representativa.

La infraestructura y prácticas de los sistemas de potencia fueron establecidas durante la primera mitad del siglo veinte, cuando la electricidad se volvió la base de una sociedad centrada en energía eléctrica. Con el paso del tiempo, las instalaciones existentes y las tecnologías establecidas se volvieron inadecuadas para estar a la altura de los requerimientos de una nueva era, donde la electricidad funge como una forma de energía y como un medio para propagar información.

⁵ “User-Centered Nonintrusive Electricity Load Monitoring for Residential Buildings”- Mario Bergés, Lucio Soibelman, Kyle Anderson (2011)

Irónicamente, las posibles soluciones a las nuevas necesidades de la sociedad de la información, requerirán del conocimiento detallado de los sistemas eléctricos que intenten mejorar. Es decir, la información sobre el desempeño de los sistemas de potencia será la clave para afrontar los retos de la sociedad de la información.

Sin embargo, obtener información de alta calidad es económicamente complicado, así también en cuestiones de confiabilidad. Se hará referencia a lo que es la monitorización no intrusiva de cargas (NILM o NIALM), como una forma para recolectar esa información con una infraestructura física mínima. Voltajes y corrientes crudas (aquella que son las primeras obtenidas en la configuración de medición) se miden en una locación para llegar a los armónicos de la señal de potencia, en primera aproximación. Analizando las “huellas” de las señales se pueden hacer diagnósticos y análisis. Así también, pueden servir para estudios de consumo energético, estimación de parámetros e identificación de sistemas. También se tratarán casos de medición no intrusivos para cuestiones de banda ancha fija y móvil.

1.3 Objetivo de la presente tesis

La presente tesis tiene como objetivo poder servir como referencia documental acerca de tecnologías de monitorización en cuestiones de energía y su relación con las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC). Se incluyen algunos contextos sociales y realidades económicas que se han aplicado en otras regiones o se podrían aplicar. Se presentan también, ejemplos del trabajo e investigación que se ha desarrollado acerca de estos temas, siendo el caso de estudio realizado, en University of Southern California, como un contacto directo con estos temas.

El autor desea exponer un conjunto de tecnologías nacidas de los sistemas de distribución y las telecomunicaciones orientadas a la optimización del uso del recurso eléctrico, así como su aplicación en medición de la calidad de otro tipo de servicios, las cuales están basadas a su vez en algoritmos, hipótesis, experimentos y principios. Esto incide en un mejor aprovechamiento del recurso financiero, pues se entiende que se generan ahorros ya que se toman mejores decisiones. También, es valiosísimo mencionar la principal ventaja de esto, pues es necesario definir un contexto más amplio y de un “bien mayor” como lo es la implicación ecológica que esto puede tener.

Estos esfuerzos son una realidad desde hace un par de décadas, y es lo que se detalla a lo largo del presente documento, junto con las herramientas matemáticas y físicas sobre las cuales se fundamentan los resultados.

¿Dónde comenzó? ¿Qué técnicas existen? ¿Existen productos actualmente que lo apliquen? ¿Por qué hacer una tesis sobre esto? Las primeras se tratarán de responder más adelante, excepto por la última pregunta que se responde en este mismo momento. En mi último semestre de la carrera de ingeniería en telecomunicaciones, participé en una convocatoria para poder realizar una estancia de investigación en la afamada University of Southern California (USC), la cual tuvo lugar en el verano de 2012, dentro del Departamento de Ingeniería Eléctrica. Ahí estuve bajo la tutela de dos grandes académicos: los doctores Urbashi Mitra y Marco Levorato. Si bien ha pasado tiempo desde entonces, los conceptos y experimentos analizados entonces siguen siendo la base de muchas tecnologías que hoy ya son una realidad en muchas partes y con un enorme potencial por explotar aún.

El proyecto tuvo que ver con el análisis de datos tomados en una residencia, desde el nodo de toma eléctrica (capítulo 3). Contaba con el bagaje necesario para procesar los fundamentos teóricos, gracias a las muchas materias relacionados con electricidad, magnetismo y electrónica.

Conforme leía más los *papers* que mis tutores me encomendaban, iba encontrando la conexión con las comunicaciones, entendiendo que ellos sabían por qué yo era apto para ello. Bastó ver que tenía que ver con procesamiento de señales, electricidad, redes inalámbricas, protocolos de comunicación, sistemas digitales, internet de las cosas, Big Data y demás disciplinas, para que me sintiera atraído por lo que estaba haciendo. A eso, hay que sumarle que siempre me han atraído los esfuerzos hacia un mejoramiento de la sociedad, especialmente aquellos que impactan directamente con la gente de bajos recursos, por lo que el potencial del proyecto se tornó muy interesante y esta tesis sería solo un primer peldaño hacia todo lo que se podría conseguir con planificación, preparación, recursos y deseo.

Entonces, considere la presente tesis un esfuerzo con alcances en la tecnología, ciencia y sociedad, que son necesarios para tratar un tema como lo es el consumo de electricidad y la optimización de este proceso. Y espero que esta tesis, se encuentre información útil respecto de todo lo que se ha mencionado hasta ahora. Una vez más vemos como la ingeniería es un agente capaz de moldear y transformar nuestra sociedad y realidad.

Capítulo 2

Contexto Histórico y Social

El movimiento global de restructuración de los sistemas de Servicio Público de Electricidad (SPE) iniciado a finales del siglo 20, parece haber terminado; incluso, ya estamos presenciando su reconsideración, también globalmente. Casi todos los países del planeta han ensayado, con diversos grados de éxito, con diferentes enfoques y con múltiples métodos, lo que se ha dado en llamar, la reforma eléctrica o energética.

En general, al someter el servicio eléctrico público a los mecanismos de mercado y considerarlo como otro producto más, se pasa por alto que este servicio tiene características que lo hacen diferente de otros. Haciendo una analogía, el transporte aéreo también es un servicio público. Cualquiera puede adquirir un boleto de avión en cierta fecha y usarlo en otra muy distante; existe una gran variedad en la oferta: primera clase, clase económica, en lista de espera, no reembolsables, no sujetos a cambios, etc. El consumidor puede decidir la modalidad que desee, para usarlo o no, según su conveniencia. Puede incluso prescindir por completo del servicio sin que ello necesariamente afecte su modo de vida. Algo parecido ocurre con la telefonía celular: en el mercado pueden competir ofertas diversas y ello puede significar ventajas para el consumidor incluyendo la baja de precios.

Con el servicio eléctrico ocurren cosas distintas. No es algo que el usuario pueda comprar y almacenar para usarlo en el momento que le convenga, excepto en circunstancias muy específicas; el servicio se le debe proporcionar con características únicas dentro de ciertos márgenes de tolerancia sujetos a regulación: a 110 V, 60 Hz, sin interrupciones, en todo el país. Es importante entender estos principios para poder tratar temas socioeconómicos más elaborados respecto a la electricidad como recurso nacional.

La energía eléctrica es un bien que produce el hombre y que, por sus propiedades físicas, no es posible almacenar, por ello es que su análisis reviste particularidades importantes. El sistema eléctrico debe estar perfectamente

balanceado en todo momento para evitar interrupciones o fallas en el servicio. Esto se logra a través del despacho eléctrico y constituye una parte central en la industria eléctrica, pues posibilita que el servicio se preste de manera **confiable, segura y a bajo costo**. Estas características hacen indispensable que esta función se lleve a cabo de manera centralizada. Igualmente se debe considerar que el sector eléctrico en México cuenta con un subsidio, muy al estilo como pasa actualmente con el servicio de agua, por poner un ejemplo.

La **energía eléctrica** es un recurso fundamental en la vida de las sociedades actuales, tanto como el agua. Se encuentra presente en prácticamente todos los órdenes de la vida moderna. Resulta primordial para el desarrollo de las actividades económicas, científicas, culturales, sanitarias, recreativas y domésticas. Imposible resulta el imaginar una sociedad actual sin este servicio.

En el momento en el que la electricidad dejó de ser privilegio de unos cuantos y su uso se extendió a la población de las grandes ciudades como servicio público, la industria eléctrica ha sido monopolio natural del Estado en muchos países del mundo, por dos razones fundamentales. En primer lugar, porque las plantas generadoras de electricidad requerían de grandes inversiones, y a veces porque la decisión de construir una gran presa puede afectar de manera importante la **ecología** de una región, situación que en muy pocos países podía quedar en manos privadas.

Se necesitaba de muchos años de construcción para la planta y las obras asociadas, de modo que la recuperación de las inversiones requería con frecuencia de plazos muy largos para resultar atractivos al capital privado. En segundo, en una ciudad sólo podía haber una red de distribución del flujo eléctrico por limitaciones técnicas, y esto constituía de manera natural un **monopolio natural**, un monopolio para el responsable de construir y operar la infraestructura.

La tecnología ha avanzado de formas importantes, ahora resulta posible la construcción de plantas generadoras de mediana y pequeña capacidad que no requieren de una infraestructura masiva; tal es el caso de las instalaciones hidroeléctricas, eólicas, solares, de combustibles varios, etc., cuyos tiempos de construcción son más cortos, y permiten el autoabastecimiento y la venta de

excedentes para el servicio público. Todo ello compartiendo una **red general** a la que se puede incluso incorporar la oferta de otros servicios como el de telefonía y datos, tal como se hizo referencia a ello en la introducción; podría decirse que en los últimos treinta años, los avances tecnológicos han contribuido a cambiar de manera importante el panorama del abasto energético en el mundo, y estos cambios se suman a los derivados de otros aspectos como los, **geopolíticos, económicos o sociales**, y al del **crecimiento de la población**.

Desde un punto de vista estrictamente teórico, la privatización se justifica si se cumple que el valor social de la empresa bajo operación privada, más el cambio en el bienestar debido a la transferencia del monto pagado del sector público, es mayor al valor social de la empresa bajo administración pública. Otra forma de entender esto, está en el vender si el precio ofrecido por el comprador es mayor al precio mínimo de referencia del gobierno.

En el siguiente apartado se tratará de hacer una analogía con otras naciones, de lo hasta ahora aquí presentado, pero antes de ello, resulta útil reconocer que existe un consenso respecto a que la **privatización** acompañada de **políticas desregulatorias**, puede generar efectos benéficos a la sociedad, como son el aumento de la eficiencia con que la empresa privatizada utiliza recursos productivos y mejora en la situación fiscal. Varios estudiosos del tema consideran que mediante la privatización se puede aumentar la producción, mejorar la calidad y reducir el costo unitario. En la obtención de estos resultados es sumamente importante la estructura de mercado en que participa la empresa. La eficiencia de asignación puede ser alcanzada en empresas que cuentan con poder de mercado, si posterior a la privatización, se genera competencia y una adecuada regulación.

sistemas de potencia autónomos se entienden sistemas que deben obtener su energía sin conexión a una red eléctrica y alimentar una carga con funcionamiento ininterrumpido. Ejemplos clásicos de este tipo de sistemas se encuentran en los satélites de comunicaciones, aunque en la actualidad, con el creciente uso de las energías alternativas, su uso se está extendiendo en aplicaciones terrestres basadas en energía solar fotovoltaica o eólica. Los conceptos involucrados en este tipo de sistemas también se emplean en sistemas de alimentación ininterrumpida utilizados en telecomunicaciones. Dentro del campo de la energía solar fotovoltaica y eólica se destacarán los

sistemas de potencia utilizados en instalaciones fijas (instalaciones para viviendas) o móviles (coches solares fotovoltaicos).

La cuestión sobre *calidad en la potencia entregada* se refiere al correcto funcionamiento de diversos aparatos eléctricos en función de cómo se ajustan a la potencia eléctrica, de forma que estos sistemas trabajen dentro de límites positivos para no afectar su tiempo de vida ni funcionamiento; es decir, la potencia necesaria para que una carga dada no se dañe.

El dilema de la **calidad de potencia** está ganando más atención, en parte porque las consecuencias de los primeros retos y en parte por el uso incrementado de cargas sensibles no lineales. La desregulación de la proveedora eléctrica parece haber degradado, al menos temporalmente, la confiabilidad y la calidad de la energía, llevando esto incluso a apagones y numerosas interrupciones en los servicios. Normalmente, los sistemas autónomos (AS), experimentan fallas en el cableado o en las tierras, como cortos circuitos entre los tramos de 14 V y 42 V en automóviles, y pueden sufrir bastante si son dedicados a misiones, como embarcaciones militares, cargadas de electrónica y computadoras.

Cada parte interesada desea algún tipo de herramienta costeable de monitorización, con la posibilidad de que pueda operar en tiempo real, para poder caracterizar las distorsiones y así tomar las medidas necesarias. Los usuarios finales suelen usar los resultados para especificar la tolerancia en cuanto a calidad de potencia de un equipo, y a la vez, ha habido intentos de agregar la capacidad de medición de la calidad de potencia recibida en los medidores inteligentes, dentro de los mercados liberalizados.

Podría pensarse que la principal motivación detrás de estos retos implicados en los sistemas eléctricos, recae en el hecho de que hemos entrado a una nueva era, **la era de la sociedad de la información**. Retomando la cuestión de la desregulación, en 2012 cumplirá 20 años el “proyecto de desregulación del sector energético mexicano”, que inició con la reforma a la ley de energía eléctrica para vincular la generación de electricidad realizada por empresas particulares al servicio público, así como la creación de la Comisión Reguladora de Energía (CRE) y la reforma a la ley del petróleo para abrir a la

inversión privada las actividades de transporte, almacenamiento y distribución de gas natural, y más tarde, la industria petroquímica.⁶

2.1 En el mundo

En contraste con México, la electricidad se considera como mercancía en los mercados liberalizados. Los generadores venden su capacidad en los mercados mayoristas. Las compañías de distribución ofertan en un mercado al contado por los mejores precios y revenden la electricidad a sus consumidores locales. En un mercado abierto, el aprovechamiento máximo de los recursos disponibles y la adquisición y comunicación de información se vuelve crítica para la supervivencia y rentabilidad de los participantes y para la prosperidad del mercado *per se*. Para este fin, las partes interesadas han invertido y han desarrollado varias transacciones en tiempo real, sistemas comerciales y de vigilancia y monitorización, impulsados por los avances en las tecnologías de comunicación. Sin embargo, hay una parte que no está preparada para estos cambios- los consumidores, que están a la cabeza de “la cadena alimenticia” de la electricidad y los supuestos beneficiarios de todas las reformas en la materia.

Los consumidores necesitan realizar decisiones más educadas en sus compras energéticas, si es que tienen la opción de elegir entre diferentes proveedores y si el cambio de electricidad cambia en tiempo real. La elección del proveedor dependerá en la calidad general del servicio, incluyendo el precio, la confianza y la relación con el consumidor. Después de que un proveedor es elegido, el consumidor necesita una herramienta de monitorización para asegurarse que el nivel deseado de servicio se está recibiendo y verificar si el consumo de energía es óptimo.

Los precios en tiempo real hacen que la situación sea más complicada, porque el consumidor debe saber cuánta potencia se está consumiendo y qué cargas están siendo usadas, en tiempo real, para hacer una decisión prudente de compra. Sin embargo, aun hoy no está claro si las compañías compartirán estos datos en tiempo real, junto con los precios corrientes y las predicciones

⁶ <http://energiaadebate.com/desregulacion-del-sector-energetico-20-anos-despues/>

de precios con los consumidores. Incluso si los datos de medición se vuelven disponibles a los usuarios finales, serán sumas agregadas del consumo de energía por cargas individuales sin ningún tipo de detalle acerca de la naturaleza del consumo de energía.

El administrador de un complejo comercial o de producción puede optar por saber el estado de las cargas eléctricas bajo su supervisión para hacer la mejor decisión de compra sujeta a las fuerzas mercantiles. Sin embargo, esta información normalmente no está disponible a menos que se lleve a cabo una inspección manual, o que se instale un aparato por separado en cada carga involucrada. Ambas opciones resultan prohibitivas en cuanto a costos y difíciles de implementar. En un mercado liberalizado los consumidores necesitan un medidor eléctrico en todas partes (omnipresente), que pueda proveerle información al instante para asistir a las decisiones de compra.

Varios **sistemas de potencia autónomos** están surgiendo en el horizonte, ganando cada vez más y más significado. Ello refiere a sistemas eléctricos, independientes o semiindependientes de la red de suministro eléctrico. Los sistemas de potencia autosuficientes en autos y barcos son buenos ejemplos de ello. Los sistemas de potencia aislados basados en fuentes alternativas o renovables, como las celdas de combustible y la energía eólica, son las más usadas. Estas están conectadas a la red en algunas ocasiones como una forma de generación distribuida.

Reino Unido es una de las regiones reconocidas mundialmente por ser precursora de una reforma eléctrica, al hacerlo de forma institucional y abierta. La reforma inglesa hizo que la historia de sus discusiones y de su teoría, la consultoría por compañías inglesas, que participaron en la reforma británica a gobiernos reformadores de sus SPE, se convirtieran en una norma mundial en los años 90. Los puntos principales de la teoría de la reforma eléctrica enunciados desde Inglaterra⁷, consisten en cuatro actividades separables:

1. Generación (o producción)
 2. Transporte en alta tensión (transmisión)
-

⁷ Surrey et al, *The British Electricity Experiment. Privatization: the Record, the Issues, the Lessons*, Earthscan Publications Limited, London, 1996.

3. Transporte local en baja tensión (distribución)
4. Venta al detalle y promoción (suministro)

Así, el servicio público originalmente controlado por el estado en forma vertical y monopólica se abre a las fuerzas del mercado, tal como ocurre con muchos otros productos o servicios. Este modelo de privatización fue adoptado por diferentes países: Noruega, España, Brasil, Argentina, Chile y otros. Algo similar ya venía operando en Estados Unidos, pero el común denominador era ofrecer un servicio público con los mecanismos de mercado. La base teórica de este modelo es la teoría de los Mercados Disputables⁸ desarrollada por Baumol, Willig y Panzar a principio de los años ochenta. Aunque ya desde el inicio de la década de los 70 un modelo similar, propuesto por el grupo de economistas de Chicago (los *Chicago Boys*, tratados más adelante), liderados por Milton Friedmann, había sido aplicado por Augusto Pinochet en Chile⁹. Sin embargo, fue en Inglaterra donde el modelo se aplicó de manera radical con resultados iniciales exitosos, sobre todo por los grandes recursos financieros que representó para el gobierno británico la transferencia de la industria al sector privado.

No tomó mucho tiempo para que el resultado mostrara que en el caso de los energéticos algo había en el modelo que no se comportaba en los hechos como se había previsto lo que fue reconocido años después por los mismos autores de la teoría. Escasamente seis años posteriores a la privatización de British Energy, la principal empresa generadora de energía en Gran Bretaña, se produjo el apagón de Londres y los precios del servicio aumentaron para el consumidor final, al grado de que se empezó seriamente a considerar la posibilidad de revertir el proceso privatizador.¹⁰

Con el paso del tiempo, y a pesar de que las condiciones estructurales son diferentes en cada país, experiencias como la privatización del mercado de la electricidad en Gran Bretaña son evidencia de que es posible la privatización

⁸ Un mercado disputable es aquel que no establece barreras para la participación de cualquier interesado, que existe en una rama de la actividad económica en la que todos los participantes tienen igual acceso a la tecnología y que no impone costos importantes para salir de él; En un mercado disputable pueden, según la teoría, relajarse las regulaciones antimonopolio, porque el mismo mercado se encarga de contrarrestar las tendencias monopolizadoras. (Baumol, 1988)

⁹ Thomas, S. (2003), “La Privatización y el Modelo Británico”, en *El Modelo Británico en la Industria Eléctrica Mexicana*; Coord. Leticia Campos Aragón, Siglo XXI Editores, México.

¹⁰ Berruecos, S. (2002), “Una Privatización Eléctrica Fracasada”, en *La Jornada*, México, 5 de septiembre de 2002.

radical del sector eléctrico manteniendo la operatividad del sistema, pero también que la separación vertical y la competencia potencial no son suficientes para eliminar el poder de mercado. A largo plazo se espera que la competencia opere en beneficio de los consumidores, pues en el corto, las dos empresas dominantes han representado un comportamiento orientado a prácticas monopólicas sin reflejar los beneficios que se esperan del modelo inglés para los consumidores. A pesar de ello, se espera que continúe una tendencia competitiva y, en esta medida, la convergencia de precios a favor de estos últimos.

Los resultados han podido reflejar ciertos beneficios para el Estado, producto de la venta, y para los accionistas, quienes encuentran un mercado establecido y rentable. Claro que, no todos están conformes con ello. Existe un sector importante de la población que desea que nacionalice el sector, y con ello, a *“The Big Six”*, las seis grandes proveedoras de energía en esa región (British Gas, EDF Energy, E.ON Energy, npower, Scottish Power y SSE).

Sobre **Estados Unidos**, dada la directriz que representa este país a nivel mundial, es necesario primero explicar y comentar lo que le compete en materia eléctrica para proseguir.

En este país, son las *“Public utilities”* las empresas eléctricas, típicamente privadas que poseen una concesión para servir energía eléctrica, conformando de esta manera monopolios regulados, con compromiso social, integradas verticalmente, abarcando los deberes de generación, transmisión, distribución y comercialización. Estatalmente hablando, las empresas están controladas por un órgano llamado **“Public Utilities Commission (PUC)”** quien fija las tarifas y la tasa de ganancia. Federalmente, las controla **“Federal Energy Regulatory Commission (FERC)”**.

Desde la perspectiva de la crítica neoliberal, se clamaba desde los años 80 que los monopolios eléctricos no daban los incentivos necesarios para asegurar una buena calidad de servicio, además, que la red de transmisión de alta tensión y los sistemas de distribución son adecuados para el esquema de monopolio natural pero que es posible introducir competencia en materia de generación y comercialización, pero para ello, es necesario desintegrar las funciones de generación, transmisión y distribución.¹¹ Con esta premisa, el

¹¹ Viqueira Landa, J. (2001), “EL FRACASO DE LA DESREGULACIÓN

Congreso de Estados Unidos aprobó en 1992 una nueva ley sobre energía (*Energy Policy Act, EPACT*) que modifica la ley de 1935 (*Public Utility Holding Company Act, PUHCA*) y establece la creación de generadores de electricidad independientes de las empresas eléctricas, no sometidos a la regulación a la que están sujetas dichas empresas y que pueden suministrar energía eléctrica a grandes consumidores o a empresas de distribución, en competencia con las empresas eléctricas. Para hacer esto posible la nueva ley obliga a los propietarios de la red de transmisión a permitir el uso de dicha red por los generadores independientes, mediante el pago de un peaje, de manera que puedan suministrar la energía eléctrica a sus clientes.

Referente al apartado sobre Reino Unido, en **Estados Unidos** ocurría algo parecido. En agosto de 2003, se presentó, en el área de Nueva York y una extensa zona que abarcó hasta Toronto en Canadá, un apagón que se ha considerado como el de mayor alcance y consecuencias en la historia norteamericana. La energía eléctrica de toda esta zona era provista por empresas privadas, como *Niagara Mohawk, Edison International, National Power, etc.* Una intensa investigación que se realizó para determinar las causas del evento reveló que la desregulación y la reestructuración de la industria eléctrica que finalmente culminó en su privatización “*habían tenido un efecto catastrófico sobre la confiabilidad de operación del sistema de potencia norteamericano*”.¹²

Esa tarde de verano, con la demanda eléctrica en aumento rumbo a la “hora pico”, una subestación se sobrecalentó y llegó a tener contacto con las copas de los árboles; la centella resultante hizo que operaran los sistemas de protección de las subestaciones de transformación asociadas a la línea, que desconectaron la misma. Al final, unos 62,000 MW se desconectaron y unos 50 millones de personas se quedaron sin electricidad. El informe del comité conjunto norteamericano canadiense, firmado por el secretario de Energía de Estados Unidos y el ministro de Recursos Naturales de Canadá, concluye que el accidente pudo haber sido evitado; asimismo informa que hubo violaciones a las normas de confiabilidad de los sistemas eléctricos, que establecen

ELÉCTRICA EN CALIFORNIA”, Ponencia presentada en el ciclo de videoconferencias, La energía en México hoy, coordinado por la maestra Leticia Campos Aragón, investigadora del IIEc y directora de Problemas del Desarrollo, del 14 al 16 de febrero de 2001, en el auditorio de la Dirección General de Servicios de Cómputo Académico (DGSCA), UNAM, en Ciudad Universitaria.

¹² Casazza, J., F. Delea y G. Loehr, (2005), “*Contributions of the Restructuring of the Electric Power Industry to the August 14, 2003 Blackout*”, en las memorias Del taller sobre Competition and Reliability in North American Energy Markets, Toronto-Ontario, septiembre de 2005.

prácticas de operación, supervisión, mantenimiento y construcción de nuevas instalaciones para asegurar la confiabilidad del servicio.¹³ Establece además, cómo la operación de los sistemas, aunque estaba a cargo de algunos operadores, estos no tenían autoridad sobre las plantas generadoras de las diversas compañías. Igualmente describe cómo el mantenimiento rutinario a las líneas de transmisión no se efectuaba. Las mediciones y alarmas relacionadas con la carga en las líneas no eran atendidas, precisamente porque los operadores de sistema no tenían autoridad sobre los operadores de las plantas. Así, el informe indica sutilmente que el libre mercado no es la receta para sostener el SPE.

En 1995, en el estado de California, la PUC emitió una decisión para reestructurar la industria eléctrica y poder lograr introducir competencia, pero las empresas no serían muy eficientes y los precios se elevaron. Por esto, se tuvo que dejar intervenir a la legislatura del estado, y después se firmaría la ley para lograr tal reforma, logrando que no solo los grandes consumidores de energía eléctrica pudieran elegir su suministrador, sino también aquellos pequeños. Se tuvo que reorganizar el funcionamiento de la industria eléctrica.

Se creó un sistema de transmisión interconectado conformado por la infraestructura de las tres más grandes del estado y se llamó **“Independent System Operator (ISO)”**, responsable de establecer el despacho previo del sistema de generación y transmisión, operándolo en tiempo real y convenir los arreglos financieros necesarios. Se creó otro organismo llamado **“Power Exchange (PX)”** con el fin de llevar a cabo las operaciones de compra y venta con base en cotizaciones para cada hora del día siguiente propuestas por las diferentes empresas generadoras. A los consumidores que les resulte más conveniente, pagan un cargo de peaje por el uso de las líneas de transmisión y distribución. Acerca del **funcionamiento de la industria eléctrica reformada en California**, se obligó a las tres grandes a vender las plantas, compradas por ocho independientes, mientras las tres grandes se siguieron ocupando de distribución y venta. Aunque parecía funcionar bien, se empezaron a dar problemas en San Diego a raíz de un alza y una oleada de calor y una sequía. No se previó el crecimiento de la demanda. Se terminó aboliendo el PX. Vale la pena hacer una reflexión al respecto al final de la presente tesis acerca de

¹³ U.S. – Canada Power System Outage Task Force, *Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations*, April 2004.

estos puntos, pues al parecer, resulta muy complicado desregular la electricidad y el deber considerar el inevitable **factor humano**.

Es así entonces, cómo en el **estado de California**, se dio lo que se considera uno de los más grandes casos referentes a lo tratado. Aquí el modelo de reforma tuvo su mayor éxito y aquí también tuvo su principal y más notorio fracaso. En el origen, en 1996, la **FERC**, condujo en Estados Unidos un importante esfuerzo de análisis entre las múltiples compañías eléctricas de ese país; en ese trabajo, participaron 409 compañías eléctricas, casi todas norteamericanas, unas pocas canadienses y la mexicana CFE. El resultado de este esfuerzo fue la famosa **Order 888** de la FERC¹⁴, "*para la promoción de la competencia mayorista a través del acceso abierto no discriminatorio*" a las redes de transmisión.

La 888 es un ejemplo de trabajo técnico de un alto nivel, desarrollado en el país más industrializado, por los profesionales de una industria que es vital para el funcionamiento de la sociedad, mismos que tenían la visión de que el SPE podía convertirse en un mercado abierto a la competencia y que podría dejar de ser un servicio público, regulado como tal por los gobiernos; toda la idea de los economistas que inspiraron el **modelo chileno**, el mismo que fue perfeccionado por los reformadores ingleses, tuvo ahora la participación de la industria eléctrica norteamericana.

Esta contribución fue predominantemente conceptual, pero posee un nivel técnico muy detallado; en ella se incluye, desde el fundamento del acceso abierto a las redes de transmisión, hasta cuestiones específicas de los servicios auxiliares de transmisión y las reglas de despacho; existen conclusiones y recomendaciones sobre los costos de las compañías existentes y también previsiones acerca de la disponibilidad y eficiencia térmica de las unidades termoeléctricas; existe el diseño de un mercado en tiempo real, con comunicaciones de ofertas, prácticamente instantáneas por Internet, junto con la recomendación de crear organismos operadores independientes de sistemas (*Independent system operators - ISO*) y los operadores de ese mercado en tiempo real (*Power Exchange - PX*). Resulta parecer una gran obra, fundamentada en la tecnología de generación, transmisión y

¹⁴ Federal Energy Regulatory Commission, <http://www.ferc.gov>, Order No. 888, Promoting Wholesale Competition Through Open Access Non-discriminatory Transmission Services by Public Utilities; Recovery of Stranded Costs by Public Utilities and Transmitting Utilities, April 24 1996.

distribución de electricidad, acumulada en un siglo de desarrollo de la industria eléctrica, complementada con los últimos avances de la **informática y las telecomunicaciones**.

Se puso en práctica en California y en menos de un año, el experimento fracasó, entre noviembre 2000 y mayo 2002. El gobierno del estado tuvo que intervenir para imponer un freno a los precios ofertados por los generadores. En cuanto el mercado mayorista inició su funcionamiento, las compañías generadoras de electricidad, así como las proveedoras de gas, actuando conscientemente en contra de los consumidores causaron escasez tanto de combustible como de capacidad de generación para aumentar los precios de la energía.

El daño a la economía californiana por la aplicación de las reglas de mercado fue de más de 30,000 millones de dólares.¹⁵

La desregulación del sector eléctrico y su privatización ha producido un aumento de precios para el consumidor y la escasez de la oferta. En el verano de 2000, los californianos se enfrentaron a una escasez del suministro eléctrico y a prolongados apagones. Quizá como consecuencia de ello la captación en el estado por tarifas eléctricas pasó de 7000 millones de dólares (mdd) en 2000, a 27 mil mdd en 2002¹⁶. En años recientes, México ha tenido que vender energía eléctrica al sur de California a fin de luchar contra la escasez. California confió en la retórica del libre mercado, y los grupos interesados ignoraron las realidades técnicas, la experiencia internacional y el sentido común. Pero no sólo en Estados Unidos y el Reino Unido se han reportado estas experiencias negativas. También en **España, Brasil y otros países sudamericanos**.

Este caso, ha sido **la mayor fuente de aprendizaje en todo el planeta**; si en cualquier país se usa a California como referencia de lo que no debe hacerse, se habrá acertado. **Chile** fue de los primeros países del mundo en implementar una reforma integral de su sector eléctrico en el período reciente. Entre los países en desarrollo, sólo Argentina se le asemeja en este aspecto. Esto fue la culminación del plan que los *Chicago boys*¹⁷ implantaron en este país, al

¹⁵ *Krugman, In broad daylight, 27 septiembre 2002, www.nytimes.com.*

¹⁷ Es un término aparecido en la década de 1970 para denominar a los economistas neoliberales educados en la Universidad de Chicago, bajo la dirección de los estadounidenses Milton Friedman y de Arnold Harberger.

amparo de la dictadura de Augusto Pinochet. Con el golpe de estado se tuvo un objetivo económico muy claro: recuperar bienes nacionalizados como las minas de cobre, por una parte, pero adueñarse también del resto de la economía del país, además de servicios públicos como la electricidad. En 1999, el agua de las plantas hidroeléctricas, columna vertebral del sistema de generación chileno, se agotó; la vida económica del país se colapsó; también la vida cotidiana. Hubo cortes rotativos y racionamiento de electricidad por meses; los apagones llegaron a ser de hasta 10 horas diarias.

Los nuevos dueños de las plantas heredaron todo, menos la planeación, que desapareció, y tampoco asumieron la obligación del servicio. El margen de reserva en capacidad de generación duró hasta que la reserva energética se agotó.

En el caso de Chile, en materia de privatización, se puede observar que el argumento de sanar las finanzas del Estado parece no ser suficiente y que el motivo convincente debería buscarse en otro sentido, como en el de mejorar la calidad del servicio o el aumento de la inversión en infraestructura, que en manos estatales no es realizable.

Sin embargo, la lección más importante de este proceso parece ser la realización de las reformas estructurales antes del inicio del proceso en sí para minimizar el riesgo de su fracaso como “mercado”. El Servicio Público de Electricidad (SPE) chileno subsiste hasta la fecha con una estructura muy parecida a cuando se privatizó en 1989, tiene fama de eficiente, pero sus precios no son sustancialmente menores a los de otros países y eso es parte del aprendizaje global. La historia de la reforma eléctrica chilena tiene ese capítulo de la crisis de capacidad, por no haber transmitido la función de planeación ni la obligación del servicio a los privados. Las nuevas empresas no asumieron estas obligaciones en 1999 y tampoco las han asumido después; la amenaza de apagones ha sido una constante desde entonces a la fecha. Estos dos elementos, los precios, y de manera más importante la ausencia de planeación y de obligación, causantes de aquellos apagones, han quedado como lecciones aprendidas en el concierto mundial.

De nuevo hay que tener en cuenta que como se ha mencionado, no nos podemos dejar llevar con la idea de que lo aplicado a una nación es válido para otra; se deben que tener en cuenta las realidades de cada país.

En **Noruega**, la experiencia de la “no privatización” en la industria eléctrica mostró la forma en la que se puede incluir capital privado a través de concesiones, sin privatizar, manteniendo el control de la red completa, casi como un monopolio gubernamental. Además, resolvió los problemas de eficiencia y de mercado pues promueve y regula el comportamiento competitivo en el mercado sin perder el control sobre el funcionamiento de la industria eléctrica. Para lograrlo, la lección más importante sin duda es la creación de la Administración de Energía y Recursos Hidráulicos de Noruega como ente regulador separado de la administración, con el objeto de independizar la actividad reguladora del resto de la administración de la red. Este organismo también tiene como tarea fundamental promover la competencia para eliminar la intervención de agentes dominantes que distorsionen el mercado.

2.2 En México

La gran tendencia hacia la liberalización comercial de los sectores regulados de la economía, en los años ochenta en **Europa**, y en los noventa en **América Latina**, ha puesto la energía y las comunicaciones en el centro de atención de las transformaciones regulatorias llevadas a cabo en esta región. La reestructuración del sector eléctrico de México, iniciada en el sexenio de Carlos Salinas de Gortari, fue inspirada en el modelo británico implantado en el Reino Unido por el gobierno de Margaret Thatcher a principios de la década de los 80, y fue un cambio que preparó el terreno para la firma del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN). Siguiendo el modelo británico, una ola de privatizaciones de la industria eléctrica se extendió por el mundo, abarcando países tan distintos como **Noruega, Italia, Brasil, España, Colombia, República Dominicana**, y en cierta medida México.

Con esta idea, y dada la intención del presente capítulo, se tratará a continuación los detalles más relevantes en cuanto a los antecedentes de la industria eléctrica en **México**, pues resulta necesario ya que proporciona un contexto a nivel mundial.

La industria eléctrica de México inició en el último cuarto del siglo XIX, concretamente en León, Guanajuato en el año de 1879, y su desarrollo estuvo a cargo de empresas privadas que fueron gradualmente convergiendo y consolidándose en dos grandes grupos de capital extranjero: la **Mexican Light**

and Power Company, de capital predominantemente canadiense, y la Impulsora de Empresas Eléctricas, que operaba como filial de la empresa norteamericana **American and Foreign Power Company**.

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) se crea en 1937, por decreto del presidente Lázaro Cárdenas, con el propósito de *organizar y dirigir un sistema nacional de **generación, transmisión y distribución** de energía eléctrica, basada en principios técnicos y económicos, sin propósitos de lucro y con la finalidad de obtener con un costo mínimo el mejor rendimiento posible en beneficio de los intereses generales.*¹⁸ La CFE coexistió con las otras dos empresas privadas desde 1937 (fecha en la que surgió) hasta 1960, pero fue desarrollando un trabajo orientado al remplazo de estas, trabajo que concluye con la nacionalización de todo el sector eléctrico del país, que se concretó el 27 de septiembre de 1960, en el gobierno de Adolfo López Mateos, mismo con el que se dio el estatuto constitucional siguiente: *Corresponde exclusivamente a la nación generar, conducir, transformar y abastecer energía que tenga por objeto la prestación de servicio público. En esta materia no se otorgarán concesiones a los particulares y la nación aprovechará los bienes y recursos naturales que se requieran para dichos fines.*¹

El suministro de energía eléctrica, **considerado como servicio público**, incluía la electrificación del medio rural y las zonas suburbanas, con la correspondiente inversión en infraestructura de transporte y distribución. Esto hacía poco atractiva la participación para la industria privada. Tratándose de una industria determinante en el desarrollo económico del país, era necesario que se atuviera a regulaciones concisas. Todo esto llevó a la adquisición por parte del Estado mexicano de una de las dos empresas privadas y la mayoría de las acciones de la otra, con lo cual el control del sector quedó en manos de la nación, tal que se consolidó la llamada **integración vertical**.

Eventualmente, la CFE se vio obligada a abrir la puerta a la inversión privada, principalmente en el rubro de generación lo cual repercutió en la necesidad de adaptar la ley referente, en la cual el inversionista privado que ganaba una licitación para la construcción de una planta, se encargaba de hacer el proyecto, financiarlo, desarrollar la ingeniería requerida, construirla y ponerla

¹⁸ Viqueira Landa, J. (2003), “¿Reorganización o desorganización de la Industria Eléctrica Mexicana?”, Coloquio Internacional Energía, Reformas Institucionales y Desarrollo en América Latina, UNAM-México, Université PMF de Grenoble, México, D. F., 5-7 de noviembre de 2003.

en operación, para después rentársela a la CFE por un período suficiente para recuperar la inversión y dejar un margen de ganancias al inversionista, mientras que la CFE absorbía cualquier riesgo derivado del aumento de costos de combustibles, salarios, inflación, etc. Con lo que se afectó no sólo el desarrollo de la ingeniería mexicana sino también la industria fabricante de materiales, componentes y equipos, pues todo ello quedaba en manos de empresas extranjeras.

En 1994, se crea la **Comisión Reguladora de Energía (CRE)**, que en 1995 se convierte en un órgano desconcentrado de la Secretaría de Energía, con las facultades necesarias para emitir licencias de generación a empresas privadas. Esta tendencia privatizadora persistió con el presidente Ernesto Zedillo, quien envió al Congreso una nueva iniciativa de reforma a los Artículos 27 y 28 de la Constitución durante su sexenio, con el objeto de permitir la participación de las empresas privadas en la generación y distribución de energía eléctrica para fines de servicio público, lo que podría verse como un preludio a una completa privatización del sector. **Esta propuesta no fue aprobada por el Congreso.** Años más tarde, en el periodo de Vicente Fox, se propusieron nuevas modificaciones a la ley para reformar el sector eléctrico, de nuevo modificando el concepto de servicio público para excluir de él a los grandes consumidores que tuvieran un consumo anual igual o mayor que 2500 MW-h). Con ello, recaía en la CFE únicamente la cobertura de usuarios menores y las otras partes podrían atender los sectores más redituables del mercado.¹⁹

La CFE no está a cargo de toda la energía generada en el país, principalmente, la generación de energía eléctrica se reparte en tres sectores: donde CFE predomina, Pemex le sigue y por último se encuentran generadores privados (bajo rectoría de la Secretaría de Energía).

Es de interés del autor, mencionar que la CFE está considerada dentro de las mejores empresas eléctricas del mundo.²⁰

Se reitera que el propósito de la desregulación de la compañía eléctrica industrial es el introducir competencia al esquema monopólico tradicional. Se

¹⁹ Campos Aragón, L. y S. Thomas (2003), “Comparativa de las principales propuestas de Reforma Eléctrica en México: 2001-2002”, en El Modelo Británico en la Industria Eléctrica Mexicana, Coordinado por L. Campos Aragón, Siglo XXI Editores, México.

²⁰ <http://www.globalenergy.com.mx/ediciones2012/top100/files/assets/basic-html/page24.html>

le fue dando derechos exclusivos de venta a los proveedores en ciertas regiones, a cambio de la aceptación de la supervisión regulatoria y la garantía de un servicio confiable. Después de la desregulación, esas unidades funcionales se volvieron entidades independientes con relaciones más horizontales y con participación en mercados más abiertos. El intento original de desregulación fue para incrementar la eficiencia, reducir los precios y mejorar, o al menos mantener, la calidad de servicio. La desregulación de las compañías proveedoras de electricidad es una tendencia inevitable, así como ha sido el caso en materia de gas y telecomunicaciones, pero puede generar varios efectos adversos durante su curso.

Con **desregulación**, entonces, se hace referencia a la introducción de competencia en la industria de la producción de energía eléctrica, en contraste con centralizarla en un órgano dependiente del estado, como en el caso de México, que según la *Constitución*, el sector eléctrico es de propiedad federal, y es la **Comisión Federal de Electricidad (CFE)** la empresa paraestatal encargada de controlar, generar, transmitir y comercializar energía eléctrica prácticamente en todo el territorio mexicano y que desde 2009 opera lo que le competía a **Luz y Fuerza del Centro (LFC)**. La CFE abastece cerca de 26.9 millones de clientes e incorpora anualmente más de un millón. El sector eléctrico se basa en gran medida en fuentes térmicas (74 por ciento de la capacidad instalada total)²¹, seguido por la generación hidroeléctrica (22 por ciento)²². Aunque la explotación de recursos solares, eólicos y biomasa cuenta con un gran potencial, la energía geotérmica es el único recurso renovable (excluyendo la hidroeléctrica) con una contribución considerable a la matriz de energía (2 por ciento de la capacidad de generación total).

Por Hablando del sector eléctrico, la capacidad efectiva de generación vinculada al servicio público creció de forma importante: de 27 mil megawatts (MW), en 1992, a 52 mil MW en 2010, significando una ampliación del 92 por ciento de esta infraestructura. En diciembre de 1992, se reformó el artículo tercero de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica para incorporar la figura de productores independientes de electricidad (IPPs), cuyo objeto ha sido vender su generación a la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

²¹ http://cec.org/files/PDF/ECONOMY/Pres-Elvira-RenEnergyMeeting_es.pdf

²² <http://www.cfe.gob.mx/QuienesSomos/estadisticas/listadocentralesgeneradoras/Paginas/listadohidroelectricas.aspx>, http://cec.org/files/PDF/ECONOMY/Pres-Elvira-RenEnergyMeeting_es.pdf

El propósito de la reforma fue justificado por el entonces presidente Carlos Salinas, partiendo de una explicación que se ha sido reiterativa desde varias décadas: “la insuficiencia de recursos” del Estado para invertir lo necesario a fin de garantizar con oportunidad y calidad el servicio de energía eléctrica. Después de 20 años las empresas privadas que participan como productores independientes (IPPs) han construido una capacidad de generación que asciende a 12,600 MW, más otros 3,400 MW con permisos de autoabastecimiento y para exportación.⁵

Entonces podemos caer en la cuenta de que los generadores privados han contribuido con poco más del 50 % de la ampliación de la infraestructura de generación eléctrica del país, que es un dato muy importante para un sector tan esencial en la vida económica y social del país.

La desregulación implicaba abrir un verdadero mercado de generadores. Como ello no se dio, la “desregulación a la mexicana” no fue suficiente para atraer mayores inversiones y que las mismas, lograran cargar con todos los riesgos.

Todo esto desemboca en un escenario donde un grupo de empresas dependientes de contratos a renta fija, las cuales ayudaron a mantener el principio del menor costo posible, pero en su conjunto, no han contribuido a bajar las tarifas, sino, por el contrario, se han convertido en una presión para aumentarlas.

Íntimamente relacionado a las cuestiones de desregulación, como se ha mencionado con anterioridad, está la cuestión sobre la **privatización**. Recordando lo sucedido con Telmex en el pasado, esto implicó que los beneficios de esta operación recayeran directamente en el Estado, producto de la venta de la empresa, y en los accionistas, que durante un periodo de seis años tuvieron garantizado el poder total de la telefonía en México. Es cierto que modernizaron el sector, sin embargo, al no existir competencia, el consumidor fue quien finalmente recibió todo el peso de la tecnificación. También podemos recordar el doloroso episodio de la banca, donde el costo de la disfuncionalidad del sector bancario nos deja un claro ejemplo de la magnitud del daño que en términos económicos puede ocasionar un proceso de enajenación sin considerar todos los escenarios probables ni las reformas

estructurales correspondientes con la importancia del proceso.

En agosto 2014, se proclama la Reforma Energética, que tiene un efecto directo en diversos tópicos energéticos, incluyendo la electricidad. De acuerdo al resumen ejecutivo²³, de ésta, se tiene que para temas de electricidad: *La Reforma Energética es un paso decidido rumbo a la modernización del sector energético de nuestro país, sin privatizar las empresas públicas dedicadas a la producción y al aprovechamiento de los hidrocarburos y de la electricidad. La Reforma Energética, tanto constitucional como a nivel legislación secundarias, surge del estudio y valoración de las distintas iniciativas presentadas por los partidos políticos representados en el Congreso.*

Además, los siguientes puntos específicos en el tema eléctrico:

2. Modernizar y fortalecer, sin privatizar, a Petróleos Mexicanos (Pemex) y a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) como Empresas Productivas del Estado, 100% públicas y 100% mexicanas.

4. Permitir que la Nación ejerza, de manera exclusiva, la planeación y control del Sistema Eléctrico Nacional, en beneficio de un sistema competitivo que permita reducir los precios de la energía eléctrica.

Se puede observar que la Reforma pretendía desde su concepción, que se incrementara la participación de particulares en la generación de electricidad, para poder lograr incrementar el número de ofertas, logrando así reducir los costos al público, también convertir a la CFE una entidad más robusta con una mejor capacidad de operación. Busca también mejorar las facultades de planificación de la Comisión Reguladora de Energía (CRE) y de la Secretaria de Energía (SE), así como también darle exclusividad al Estado en temas de control de sistema energético debiendo garantizar el acceso a éste de todos los que producen electricidad. Favorece también, la inversión en el desarrollo tecnológico de fuentes de energía que tengan el impacto mínimo en el ambiente, como la eólica, gas natural o solar.

23

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/164370/Resumen_de_la_explicacion_de_la_Reforma_Energética11_1.pdf

Otra motivación fue, de acuerdo a la Reforma, que en México las tarifas promedio son 25% más altas que en Estados Unidos, aun con subsidio, lo cual se puede considerar como un importante freno al desarrollo de la economía. En lo general, se consideraba que existía una importante ineficiencia en la producción.

A octubre de 2019, la administración vigente no ha mostrado intención de hacer modificaciones sustanciales a la Reforma²⁴, pues considera que se ha rescatado bien los propósitos de PEMEX y CFE.

Es interesante rescatar la perspectiva de una de las principales auditoras y consultoras en el mundo, como lo es Deloitte²⁵. La firma considera que si bien no se han conseguido todos los puntos originales de la Reforma, está lejos de ser un fracaso, reforzando la postura de la administración vigente, citando que hasta octubre 2018, se ha registrado la participación de 74 empresas de 20 países que derivó en más de 100 contratos.

2.3 Importancia de la calidad y aprovechamiento de los servicios

Como se ha comentado, la demanda de electricidad va al alza, junto con la demanda de banda ancha, por lo que es importante optimizar los recursos disponibles.

La calidad del servicio requiere un conjunto de tecnologías que puedan garantizar la demanda del recurso, y usarlo de forma inteligente, incluso pudiendo establecer niveles de prioridad si fuera necesario. Se puede hacer una analogía con el recurso del agua, vital para la vida humana. Podemos distribuirla, pero el cómo se haga esto, impactará directamente en la eficiencia del sistema, y finalmente, en las personas que esperan poderse servir de ésta.

Para el caso de la **energía eléctrica**, se han ido desarrollando sistemas basados en algoritmos y sensores que se distribuyen en la red para poder monitorizar la calidad de la potencia entregada y los últimos avances han sido orientados a poder generar una respuesta automática dados ciertos eventos, tendiendo a

²⁴ <https://www.milenio.com/politica/amlo-no-se-modificara-reforma-energetica>

²⁵ <https://www2.deloitte.com/mx/es/pages/dnoticias/articles/reforma-energetica-ni-fracaso-ni-exito.html>

la autonomía. Calidad en la energía eléctrica también es cumplir con las especificaciones de operación óptima respecto a los aparatos electrónicos y las normas que gobiernan su operación y alimentación, recordando que en esta región del mundo hay un rango operativo de 106 V a 127 V de corriente alterna, además de una frecuencia de operación de 60 Hz. El factor de potencia²⁶, además, indica cuánta de la electricidad entregada es realmente usada por los usuarios finales, y está relacionado con el voltaje. Por ejemplo, si cada casa en un vecindario usa su aire acondicionado, el voltaje en la última casa sería de 114 V (o incluso menos). Este bajo voltaje puede traer problemas eléctricos en esa casa. Hay una demanda actual de equipos electrónicos sensibles que requieren un voltaje y una frecuencia estable, lo que es un cambio notable de la electrónica de consumo de los años sesentas. Voltajes mayores a lo normal causa que los equipos puedan operar incorrectamente o dejar de funcionar, ya que incluso, pueden causar un daño a la red. En el Capítulo 3 se comentará la importancia y utilidad de la tecnología de *Smart grids* para este propósito.

Para el caso de **servicios de TICs**, tome el clásico ejemplo de una vía de transporte, donde se intenta desplazar en hora pico, con todo el tráfico en cuestión. Todo el desplazamiento es lento, sin embargo, una sirena comienza a sonar, un vehículo con alta prioridad sobre el resto, por lo que se deberá encontrar la forma de que este vehículo, ya sea una patrulla o ambulancia, pueda llegar a su destino final a través de ésta vía. Lo mismo puede pasar en una red de datos. Los paquetes importantes deben llegar a su destino más rápido que el resto, porque son sensibles al tiempo y expirarán si no llegan a tiempo. Hace no mucho, la red de una empresa y su red telefónica estaban separadas. Las llamadas y las teleconferencias eran normalmente manejadas por una red basada en RJ-11; las llamadas eran manejadas un sistema clásico PABX, que operaba por separado de la red de datos basada en RJ-45 que conectaba los equipos de producción. Ahora, las cosas son muy diferentes, pues se tienen aplicaciones interactivas que portan audio y video a través de la red a altas tasas sin pérdida de paquetes o fluctuaciones mínimas (*jitter*). El ancho de banda disponible por una empresa o entidad no es infinito, así que tendrá que optimizar su uso y aprovechamiento. Los parámetros más importantes cuando hablamos de calidad de servicio en un servicio de TICs son:

²⁶ <http://www.whatissmartgrid.org/smart-grid-101/fact-sheets/smart-grid-and-power-quality>

a) Latencia: cuando los paquetes (típicamente se habla a nivel de *Real Time Transport Protocol*) no tienen asignado un nivel de prioridad, serán entregados a la tasa por default del dispositivo. En una red congestionada, los paquetes deben atravesarla junto con paquetes no urgentes. La latencia no tendrá un efecto *per se* en la calidad de, por ejemplo, un contenido audiovisual, pero si la experiencia de comunicación entre puntos. Por ejemplo, a una latencia de 100 ms, dos usuarios empezarán a empalmarse uno sobre el otro mientras los paquetes llegan con retardo; a los 300 ms, se torna incomprensible la comunicación.

b) Jitter: es la variación en la velocidad de los paquetes dentro de una red, también conocida como fluctuación en español. El *jitter* puede provocar que paquetes lleguen tarde y fuera de secuencia, lo que puede conllevar a que paquetes fuera de secuencia sean descartados, lo que deriva en distorsión o huecos en los contenidos de audio o video.

c) Pérdida de paquetes: cuando la cola de salida de un *router* o *switch* se llena, puede ocurrir un descarte de paquetes hasta que vuelva a haber espacio. En general, una red muy congestionada será propensa a pérdida de paquetes. En redes celulares y móviles, una mala razón señal a ruido, tiene impacto directo en la calidad y el número de paquetes perdidos que pueda haber.

Bajo esta premisa, es fácil deducir como se pueden ver afectados servicios de transferencia de archivos o de *streaming* sin buenas políticas de calidad del servicio, incluso de llamadas o video llamadas sobre paquetes conmutados, especialmente en situaciones importantes o críticas.

Capítulo 3

Casos de estudio

3.1 NILM (Monitorización No Intrusiva de Cargas, o *Non-intrusive Load Monitoring*, por sus siglas en inglés)

Reducir el consumo de energía y reducir costos es un problema importante hoy en día que afecta a todos. En ambientes residenciales ahorrar en electricidad puede ser difícil porque el usuario suele carecer de un esquema de referencia sobre el consumo de los aparatos o de las actividades que ellos hacen consumen recursos, o siquiera cual es el consumo global. La única retroalimentación de ello que los usuarios reciben es una cuenta agregada de energía al final de cada mes. Hay estudios que demuestran que proveer a los usuarios de información de consumo en tiempo real a nivel de agregación, puede ayudar a cambiar su comportamiento y ahorrar entre 5-15% de los costos²⁷. Proveer a los usuarios de información de consumo desagregada podría hacerles ahorrar aún más.

NILM es un término usado para describir un conjunto de técnicas para obtener estimados del consumo eléctrico de aparatos individuales basándose en mediciones de corriente y/o voltaje tomados en un número limitado de locaciones del sistema de distribución en un edificio. NILM puede proveer retroalimentación de consumo en tiempo real, proporcionando elementos para mejor toma de decisiones y reducir costos. Se puede también aprovechar por compañías de suministro, controles de automatización de edificios, fabricantes de dispositivos y aparatos y otras partes para incrementar la eficiencia del uso de la electricidad y estudiar y entender mejor cómo se usa esta.

Como se ha comentado, los sistemas eléctricos pueden ser encontrados por doquier. Mientras estos sistemas variados se tornan más y más complejos, la tarea de monitorizarles y detectar fallas se vuelve difícil. Una forma de

²⁷ “*Enhancing Electricity Audits in Residential Buildings with Nonintrusive Load Monitoring*”, M. Berges, 2010

manejar esta complejidad es observando eventos, físicamente distintos entre sí, que puedan ser asociados con diferentes patrones de consumo de energía y registrando y analizando *firmas de consumo*, de tal forma que se puedan realizar análisis estadísticos acerca del estado del sistema. La monitorización de cargas no intrusiva provee una vía relativamente sencilla y barata para estas mediciones y el análisis de las mismas. Entonces, como premisa introductoria, el mayor objetivo de NILM es lograr una identificación automática específica de características de aparatos desde las métricas de potencia agregada de un edificio por medio de una cuidadosa inspección de la corriente y voltaje globales en el punto principal de alimentación.

Primero se establecen los fundamentos formales físico-matemáticos de donde parte todo esto. Esto es necesario porque conceptos y principios teóricos de NILM parten de estas premisas.

3.1.1 Antecedentes y principios

En general, se parte de los principios y relaciones entre voltaje, corriente y potencia en un sistema de corriente alterna (CA, o AC en inglés).

Hace mucho se presentó la adopción de un sistema de potencia eléctrico de AC sobre los de DC (o de corriente directa, en español), esto principalmente por su bajo costo de transmisión. Con el sistema de corriente alterna siempre se han hecho presentes las llamadas **armónicas**, **que** se refieren a las componentes espectrales presentes en una forma de onda de voltaje o corriente, cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental (en caso de México y Estados Unidos, a 60 Hz) de la forma de onda de voltaje. Las armónicas de corriente son creadas por **cargas no lineales**, como por accionamientos de variadores de velocidad (*Variable Speed Drive – VSD*, en inglés), balastos para luz fluorescente, fuentes conmutadas, rectificadores, etc. Estas **armónicas de corriente son** inyectadas en la red de suministro de electricidad e interactúan con la **impedancia** del sistema para crear **armónicos de voltaje**. Las armónicas pueden causar daño a la proveedora y a los usuarios finales tales como el sobrecalentamiento de los motores y transformadores, lectura incorrecta del medidor de watt-hora, etc. Las proveedoras tratan de minimizar estos efectos limitando el número de armónicos a ser inyectadas, de acuerdo a grupos de trabajo y normas internacionales, como el estándar 519-1992 de la IEEE, como un ejemplo.

El estudio de las **armónicas de potencia** está lejos de concluirse. Existen investigadores en todo el mundo tratando con este tema, más allá del tema de **NILM**, que atañe en la presente tesis.

Las definiciones de **potencia real, reactiva y aparente** (véase la figura 3-1 para ver la relación entre ellas) se basan en el supuesto de una forma de onda sinusoidal de una única frecuencia y cargas lineales. Las armónicas de potencia representan varios tipos de potencia en **situaciones armónicas**. Las armónicas de potencia necesitan ser definidas y obtenidas desde un análisis armónico tanto a la forma de onda de voltaje como de corriente, con una cierta cantidad de correlación cruzada entre ambas.

Es importante notar que en casi todos los trabajos en este campo y en el manejo de los paquetes o conjunto de datos relacionados a ello (*datatsets*), se hace especial énfasis en la forma de onda de corriente, dado que es la cantidad física que varía notoriamente (normalmente, por más aparatos que tengamos en casa, lo que demandamos es más corriente, y el voltaje se mantiene relativamente estable). Esta variación aporta los armónicos que se someten a análisis y que traen consigo información valiosa.

En este contexto, se trabaja entonces típicamente con potencia en armónicos de corriente, queriendo decir que solo la forma de onda de corriente es usada en el cálculo. Esto se respalda también, por el hecho de que la **distorsión en voltaje** (considerándola como la razón entre la suma de las amplitudes de armónicos de voltaje y la amplitud de la fundamental de voltaje) es usualmente menos del 5% mientras que la **distorsión de corriente** (con una definición similar) puede ser tan alta como del 150 %.²⁸

Recordemos que a la proveedora le importa más la calidad de la forma de onda de voltaje que es entregada a los consumidores. Las armónicas pueden caracterizar completamente la calidad de electricidad en el mercado por medio de la estimación de las potencias por armónicas de corriente, aumentado por un análisis adicional de los armónicos de la forma de onda de voltaje.

Es imperativo repasar los conceptos detrás de esto antes de seguir avanzando. Uno de los métodos preferidos que han venido usándose para el cálculo de

²⁸ IEEE Working Group, 1996

estas cantidades desde las muestras de una forma de onda de corriente es vía la **Transformada Discreta de Fourier** (DFT, *Discrete Fourier Transform*, por sus siglas en inglés).²⁹

En términos generales, decimos que una carga eléctrica tiene una **impedancia** determinada por:

$$\mathbf{Z} = R + jX = Z(\cos\theta + j\sin\theta) \quad , \theta = \tan^{-1}(X / R) \quad (3.1)$$

Donde R es la resistencia (parte real) y X la reactancia (parte imaginaria). Cuando esta carga es excitada por una forma de onda de voltaje sinusoidal con periodo T , extrae una corriente sinusoidal con el mismo periodo y con un desplazamiento de fase dada por su impedancia. Recordemos el concepto de **fasor**, como una representación de una función sinusoidal cuya amplitud A , frecuencia ω y fase θ :

$$I = YV = \frac{1}{Z}V \quad (3.2)$$

Donde Y es la **admitancia** de la carga. Podemos observar que la forma de onda de voltaje está dada por la componente $v(t) = \text{Re} \left\{ V e^{j\frac{2\pi}{T}t} \right\} = V \cos \frac{2\pi}{T}t$, donde hay desfase respecto a la corriente por θ . Esto queda demostrado si analizamos la parte real tal que:

$$i(t) = \text{Re} \left\{ I e^{-j\theta} e^{j\frac{2\pi}{T}t} \right\} = I \cos \left(\frac{2\pi}{T}t - \theta \right) \quad (3.3)$$

Es importante mencionar que V e I son amplitudes pico. Están vinculadas con el **valor cuadrático promedio** (*Root mean square, RMS*, en inglés) por las siguientes relaciones:

$$V = \sqrt{2} V_{rms}, \quad I = \sqrt{2} I_{rms} \quad (3.4)$$

²⁹ “*Electric Load Information System based on Non-intrusive power Monitoring*”, Kwangduk, D. Lee. MIT, 2003.

Mucho hemos comentado acerca de **potencia** hasta ahora, y es que existen dos términos de potencia relacionados a una carga dada. El primer término está dado por $P = I_{rms}^2 R$ y es llamado **potencia real o activa** y es la potencia consumida por la componente resistiva de la carga. El segundo término es $Q = I_{rms}^2 X$ el cual es llamado **potencia reactiva**, y es aquella potencia que se almacena periódicamente y que es liberada por la componente reactiva de la carga (recordar que los elementos que portan reactancia son los inductores y capacitores, positiva y negativa, respectivamente). Ambos términos pueden ser combinados en una sola cantidad compleja, llamada **potencia aparente**, dada por:

$$A = P + jQ = V_{rms} I_{rms} (\cos\theta + j\text{sen}\theta) \quad (3.5)$$

Podemos observar que el ángulo de la potencia aparente es el mismo de la impedancia de la carga; esto se presenta en la Figura 3.1 a continuación:

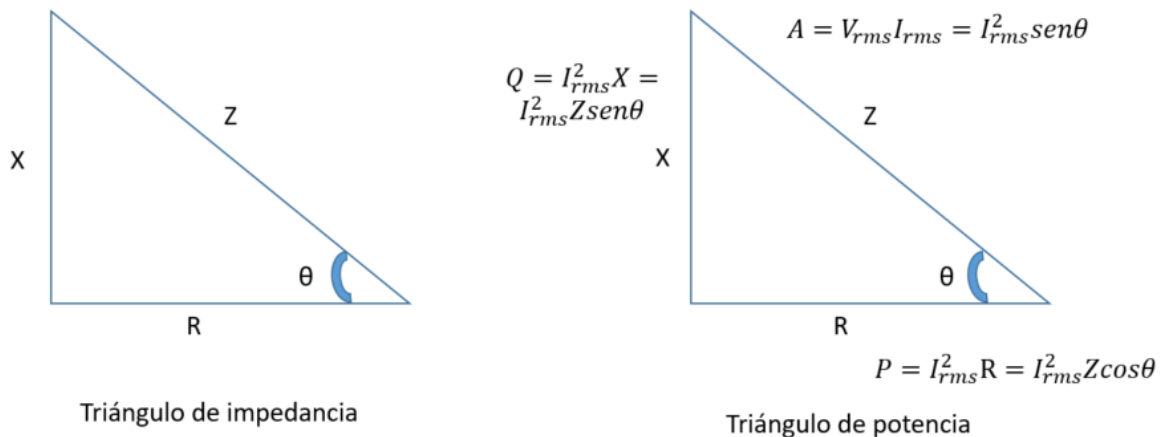


Figura 3-1 Triángulos de impedancia y potencia

Recordemos las relaciones básicas entre potencia, voltaje y corriente. Como premisa a lo que se explicará más adelante, tener en cuenta que Cambios en I y V asociados con los aparatos pueden ser medidos usando medidores convencionales o sensores de bajo costo y fácil instalación. Con $v(t)$ e $i(t)$ medidas, podemos calcular la potencia instantánea:

$$p(t) = v(t) \times i(t) \quad (3.6)$$

Dado que un de las metas de un sistema NILM es estimar el consumo total de potencia de todos los aparatos desplegados en un edificio, la potencia promedio necesita calcularse vía:

$$P_{ave}(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t p(\tau) d\tau \quad (3.7)$$

En general, podemos descomponer V e I en una serie de Fourier:

$$\begin{aligned} v(t) &= V_0 + \sum_{k=1}^{\infty} V_k \cos(k\omega t + \phi_{v_k}) \\ i(t) &= I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_k \cos(k\omega t + \phi_{i_k}) \end{aligned} \quad (3.8)$$

La potencia real puede ser obtenida tomando el producto del voltaje y la corriente y calculando el promedio sobre un ciclo:

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v(\tau) i(\tau) d\tau = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} V \cos\left(\frac{2\pi}{T}\tau\right) \tau I \left(\cos\theta \cos\frac{2\pi}{T}\tau + \text{sen}\theta \text{sen}\frac{2\pi}{T}\tau \right) d\tau \\ &= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} VI \cos\theta \left(1 + \cos 2\left(\frac{2\pi}{T}\right)\tau \right) \frac{1}{2} d\tau + \frac{1}{T} \int_t^{t+T} VI \text{sen}\theta \frac{\text{sen} 2\frac{2\pi}{T}\tau}{2} d\tau \\ &= \frac{VI}{2} \cos\theta = V_{rms} I_{rms} \cos\theta = I_{rms}^2 R \end{aligned} \quad (3.9)$$

La potencia real es el promedio en tiempo de la forma de onda de voltaje y de la componente en-fase de corriente. Esto implica que la potencia reactiva será el producto medio entre el voltaje y componente de corriente desfasada a 90°, o en cuadratura. Matemáticamente, se obtiene desplazando la forma de onda de voltaje por un cuarto de ciclo antes de la integración:

$$\begin{aligned}
Q &= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v\left(\tau - \frac{T}{4}\right) i(\tau) d\tau \\
&= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} V \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{T}\right) \tau I \left(\cos\theta \cos \frac{2\pi}{T} \tau + \operatorname{sen}\theta \operatorname{sen} \frac{2\pi}{T} \tau \right) d\tau \\
&= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} VI \cos\theta \frac{\operatorname{sen}2\left(\frac{2\pi}{T}\right)\tau}{2} d\tau \\
&+ \frac{1}{T} \int_t^{t+T} VI \operatorname{sen}\theta \frac{1 - \cos2\left(\frac{2\pi}{T}\right)\tau}{2} d\tau = \frac{VI}{2} \operatorname{sen}\theta = V_{rms} I_{rms} \operatorname{sen}\theta \\
&= I_{rms}^2 X
\end{aligned}
\tag{3.10}$$

Aquí, el voltaje desplazado no existe en la realidad, en cambio, sirve para establecer una referencia ficticia por conveniencia matemática.

Ahora es necesario profundizar en el tema de las armónicas de potencia referidas a la forma de onda de corriente.

Cabe mencionar que todo esto funciona y opera bien cuando la carga es **lineal** (que produce una corriente sinusoidal con una sola frecuencia cuando es excitada por un voltaje sinusoidal de la misma frecuencia). Sin embargo, cuando la carga es **no lineal**, la forma de onda de corriente no es de frecuencia única aun cuando es excitada por una senoide perfectamente limpia. En lugar de ello, las corrientes contienen componentes armónicos de frecuencia fundamental de la forma de onda de voltaje. En las figuras 3-2 y 3-3 se ilustra este concepto:

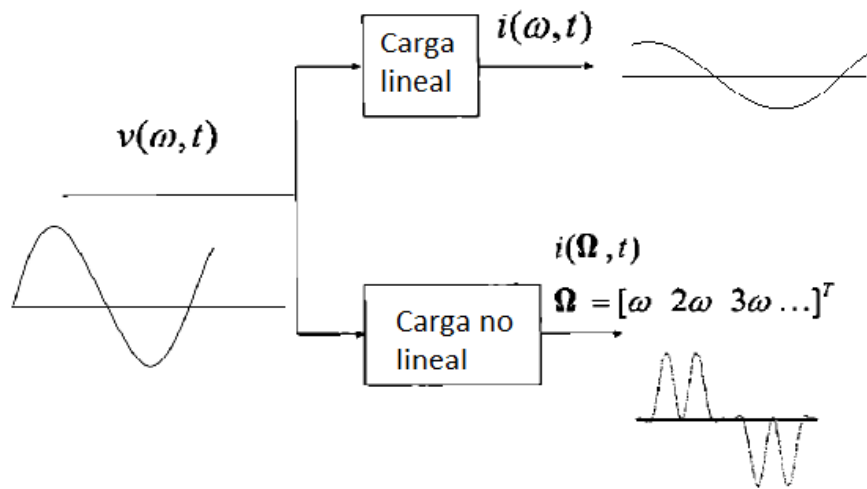


Figura 3-2. Cargas lineales y no lineales.

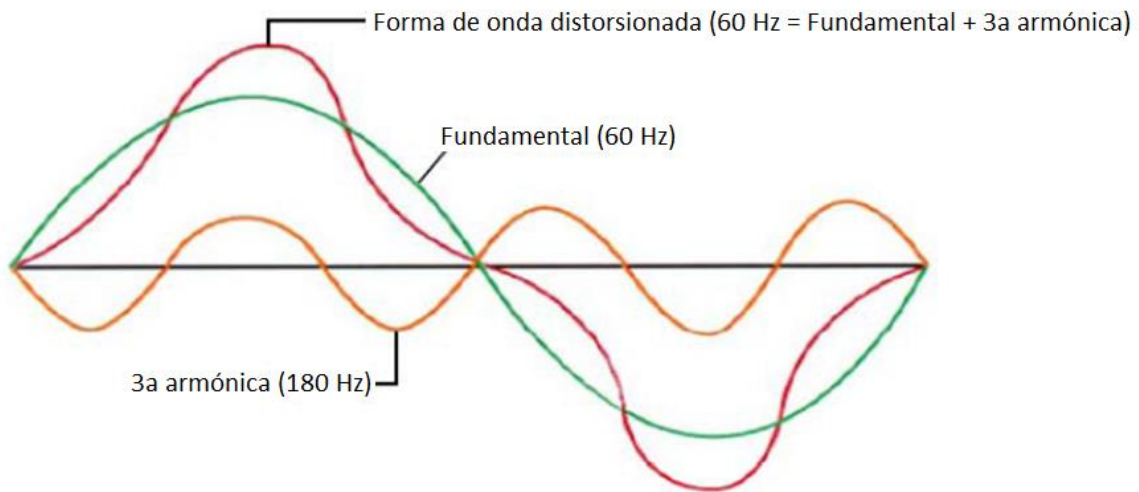


Figura 3-3. Efectos de los armónicos

Podemos usar entonces una forma de onda de voltaje armónica propiamente desplazada como referencia para el cálculo en la frecuencia fundamental. Se define entonces la k-ésima componente de potencia de armónica de corriente por las siguientes relaciones:

$$P_k = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} V(k\tau) i(\tau) d\tau = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \cos\left(k \frac{2\pi}{T} \tau\right) i(\tau) d\tau$$

$$\begin{aligned}
Q_k &= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v \left(k\tau - \frac{T}{4} \right) i(\tau) d\tau \\
&= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} V \text{sen} \left(k \frac{2\pi}{T} \tau \right) i(\tau) d\tau \quad k = 1, 2, \dots
\end{aligned}
\tag{3.11}$$

Nótese que $P_1=P$ y que $Q_1=Q$ tal que la definición es consistente en la frecuencia fundamental. Entonces, la k -ésima componente de potencia de armónica de corriente se obtiene calculando la correlación entre la corriente y la correctamente desplazada k -ésima forma de onda de voltaje. Podemos llamar a P_k como la k -ésima componente de potencia real y a Q_k la de potencia reactiva.

Repasando los conceptos previamente mencionados, sabemos que, si buscamos calcular la componente de potencia aparente, lo podemos hacer mediante la siguiente relación:

$$A_k = \sqrt{P_k^2 + Q_k^2} \tag{3.12}$$

Para los propósitos de este trabajo es suficiente contar con la forma de onda de voltaje fundamental (su amplitud, frecuencia y fase) para calcular las potencias de armónicos de corriente. Entonces, estas componentes armónicas pueden obtenerse siempre que sea pueda extraer esta información, incluso si se trata de una forma de onda de voltaje distorsionada.

Se tienen estas relaciones importantes, que incluyen las descomposiciones de las formas de onda de voltaje y corriente en series de Fourier, donde V_0 e I_0 indican valores medios; también una forma de considerar la potencia reactiva en función los promedios como se ve en las ecuaciones 3.13, donde las cantidades testadas son valores RMS:

$$\begin{aligned}
P_{ave}(t) &= V_0 I_0 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} V_k I_k \cos(\phi_{vk} - \phi_{ik}) \\
Q_{ave}(t) &= \overline{V_0 I_0} + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \overline{V_k I_k} \text{sen}(\phi_{\overline{V_k}} - \phi_{\overline{I_k}})
\end{aligned}
\tag{3.13}$$

En resumen, los armónicos son múltiplos de la frecuencia fundamental y se originan por componentes no lineales, como un diodo o un transistor. Generan distorsiones de onda. Si un equipo no es diseñado con cuidado, las armónicas podrían generar fallas. En ingeniería eléctrica se conoce el problema de la infame tercera armónica, que genera problemas, pues al existir propiamente una primera y segunda armónica, un sistema está balanceado pues existe una cancelación de efectos, sin embargo, al existir una tercera, generando una corriente por el neutro, que típicamente se puede evadir con ciertas configuraciones electrónicas, como una red de tipo delta. En la figura 3-4 se ilustran las armónicas mencionadas:

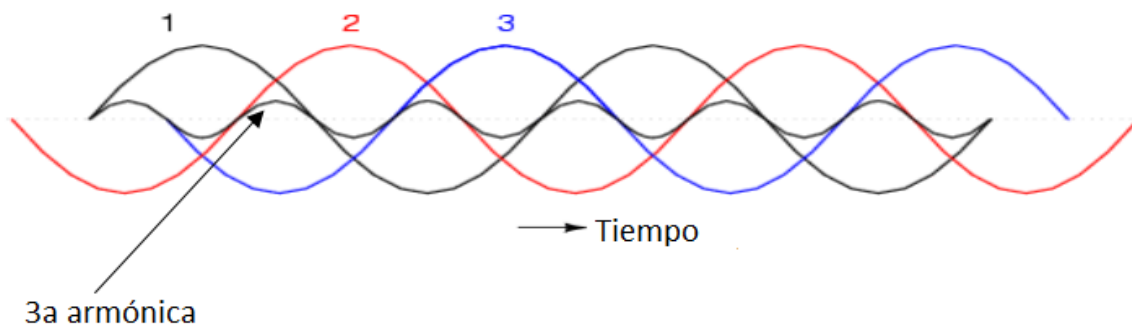


Figura 3-4. Ondas de armónicas, incluyendo la 3ª

Surge el tema de cómo se calculan los armónicos de potencia, una vez que se tiene claridad acerca de las formas de onda crudas de voltaje y corriente, preferentemente en tiempo real. Las definiciones sugieren que una vez que se logra extraer un ciclo de la forma fundamental de voltaje, se puede crear formas de onda de referencia tal que se puedan obtener armónicos de potencia vía los productos de las referencias y la corriente.

Existe toda una línea de investigación al respecto, buscando formas más rápidas, exactas y confiables para este tema, por ejemplo, el trabajo de Steven Leeb, que ha dado pauta a otros postulados. Steven Leeb desarrolló un estimador de potencia de armónicos de corriente compuesto de un elemento PLL (*phase locked-loop*) para extraer la fundamental de voltaje, sintetizadores de onda para crear formas de onda de referencia, multiplicadores y filtro paso-bajas para simular el proceso de integración³⁰. Básicamente de aquí han partido nuevas premisas en este apartado.

³⁰ “*Nonintrusive Load Monitoring and Diagnostics in Power Systems*”, S.Steven R. Shaw, S.B. Leeb, 2008

Uno de los esquemas más recientes es el propuesto por Lee Kwangduk³¹, al valerse de la relación entre las series de Fourier en tiempo continuo (CTFS) y la transformada de Fourier discreta (DFT) por medio del teorema del muestreo. Kwangduk parte de la referencia creada por otros como Luo, El-Habrouk, Darwish, entre otros, donde se estudia esta importante relación. Exhortamos al lector a referirse a estos trabajos para los detalles completos.

3.1.2 Aplicaciones

La monitorización de cargas no intrusiva (NILM, por sus siglas en inglés – *Non-intrusive load monitoring*)³², es un conjunto de técnicas de monitorización de cargas y de procesamiento y análisis de señales que pretende poder identificar aparatos individualmente en ambientes residenciales o comerciales, o diagnosticar los sistemas electromecánicos de, por ejemplo, un vehículo naval a través de monitorización continuo de los cambios en los estados de ON/OFF de varias cargas.

Es una tecnología que parte de la premisa de desagregar cargas eléctricas individuales, esto debido a las varias cargas que existen en alguna vivienda o edificio, desde mediciones hechas en una locación centralizada, como la entrada del servicio del *electric utility* (proveedora de servicios de energía eléctrica).

Pero, ¿cómo surge NILM? ¿Quiénes son los responsables de ello? ¿Quiénes están involucrados actualmente? ¿Qué se está haciendo en este campo y cómo afecta a los aspectos socioeconómicos comentados hasta ahora? Se empieza por **George Hart** y su trabajo.

Sería en la década de los ochenta que George Hart escribiría en uno de sus trabajos más importantes algo como: *Una monitorización no intrusiva de cargas determina el consumo de carga que prenden y apagan en una carga eléctrica basándose en análisis del voltaje y la corriente, medido desde la interfaz a la fuente de poder, pudiendo descubrir la naturaleza de cada aparato y su consumo, y otros datos importantes como variaciones según la hora del día*. Esto resulta muy interesante, pues requiere de entendimiento de

³¹ “*Electric load information system based on non-intrusive power monitoring*”, Kwangduk, Lee. MIT 2000

³² Aunque otros académicos le llaman también **NALM** o **NIALM**, por variaciones a la frase “*Non intrusive appliance load monitoring*”, sin embargo, la mayoría usan el acrónimo **NILM**

teoría de **sistemas de potencia** y teoría de las **comunicaciones** para fines de decodificación. Se considera no intrusiva, dado que no tiene un impacto, o el mínimo posible, para el usuario.

George Hart, un académico del MIT, fue de los primeros en escribir un trabajo claro, ordenado y valioso al respecto, tal que, es considerado por muchos como uno de los pioneros de este conjunto de técnicas conocidas como NILM.

La idea de Hart era la creación de un sistema NILM capaz de ser útil para la industria y la sociedad, con una visión rentable y con una intrusión mínima en las propiedades residenciales o industriales, definiendo los principios físico-matemáticos que, en su momento, él consideró primordiales para su diseño e implementación. El sistema debería generar datos muy útiles para **consumidores, aseguradoras, fabricantes**, etc. Se propuso monitorizar revisando las “firmas” (huellas eléctricas) que nos permiten aseverar eventos respecto a los aparatos (por ejemplo, un refrigerador consumiendo típicamente 250 [W] y 200 [VAR], y de momento se detecta un cambio en alguna de estas cifras, es suficiente para poder aseverar que algo ha sucedido. De este análisis se pueden conseguir **estadísticas importantes**; todo esto producto de un profundo **análisis de la potencia reactiva total o los armónicos de corriente**. Una de las premisas fundamentales planteadas por Hart y ahora compartidas por los académicos actuales, es que NILM sea poderoso al apelar al *hardware* simple pero ejecutando un procesamiento de señales complejo. Es necesario un modelo para poder desagregar correctamente las componentes de la carga, y así lo explicaba Hart en su trabajo *Nonintrusive Appliance Load Monitoring*.³³

Hart hablaba de dos esquemas de NILM: Manual Setup NALM (MS-NALM) es un enfoque donde se requiere un periodo de intrusión, requiere de estar apagando y prendiendo aparatos, observar las firmas. Por otro lado, existe el Automatic Setup NALM (AS-NALM), se configura mientras mide la carga, usando la información *a priori* de las características de algunos aparatos, debiendo determinar las firmas importantes y con quién están relacionadas. Es lógico pensar que pasar por MS-NALM primero, es un paso necesario para poder mejorar AS-NALM.

³³ “*Nonintrusive Appliance Load Monitoring*”. George W. Hart, 1992.

Hart ya tenía una visión interesante en cuanto a las capacidades del sistema. Acorde a sus argumentos, los monitores grandes pueden monitorizar cientos de clientes, poniendo monitores en dos a ocho de las cargas mayores como la calefacción, calentadores de agua, refrigeradores y aire acondicionado. Estos datos se pueden procesar de forma estadística para fines de **predicción, aseguradoras, diseñadores, y auditorías**. En esta última pone un poco más de énfasis, pudiendo poner el sistema de forma temporal, para obtener sugerencias de reducción de consumo, incluso pudiendo mostrar un reporte desagregado como el de la cuenta telefónica (esto es todavía uno de los **estandartes actuales** de NILM). Le siguen otras **aplicaciones derivadas** como **detección de fallas** en aparatos, **seguridad y casas inteligentes o automatizadas**.

Si se habla de obtener información de consumo eléctrico es necesario conocer el marco técnico que rige la distribución de la misma, en este caso, en Estados Unidos, (prácticamente igual que en México), y de las propiedades de las dos fases A y B, y su relación con aparatos de 120 V y 240 V (Con fines informativos y complementarios, se muestran los voltajes y frecuencias operativas en el mundo en la Figura 3-5), y como hay cargas puramente resistivas, como focos o filamentos, y otros, como los motores tienen componentes reactivas.

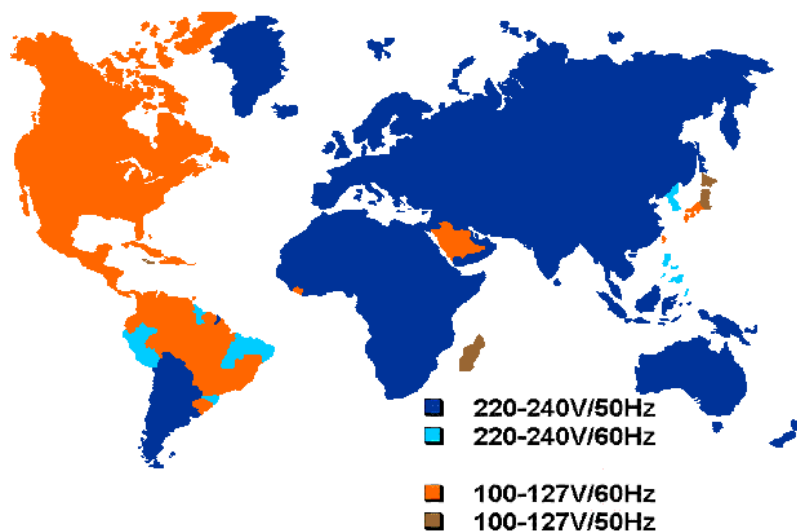


Figura 3-5. Con fines informativos y complementarios, se muestran los voltajes y frecuencias operativas en el mundo

Definió un **proceso de conmutación $a(t)$** para **n** aparatos y los ***p*-vectores** (una carga multifase con **p** fases se puede modelar como un **p**-vector en el que cada componente es la carga en una fase dada (como para aquellos

elementos bifásico). El p-vector total de carga es la suma de los p-vectores individuales de los aparatos encendidos en un punto cualquiera en el tiempo. Éste vector será una función de tiempo, escalonada en incrementos característicos cada vez que un aparato se encienda o apague. Entonces, para $i=1\dots n$, P_i será el p-vector de la potencia que el i-ésimo aparato consume cuando está operando. En el ejemplo del circuito bifásico, cada P_i es un vector complejo de dos componentes. Una de las componentes es cero para aparatos de 120 V, ya que solo una parte de ellos está involucrada. Las dos componentes serán igual para cargas balanceadas en 240 V y un vector arbitrario representará una carga desbalanceada en aparatos de 240 V. Hart comenta sobre cómo se podría reducir el término errático $e(t)$, pero concluye que esto puede ser un poco improbable e inverosímil, así que es necesario establecer principios adicionales (*Switch Continuity Principle*, que es uno de los fundamentos de NALM). Además, asegura que son necesarios procedimientos heurísticos para tratar ciertas posibles situaciones, cuestiones probabilísticas o los modelos mismos.

$$P(t) = \sum_{i=1}^n a_i(t)P_i + e(t)$$

Proceso de conmutación definido por George W. Hart

Este modelo de potencia consumida $P(t)$ considera un vector p (una potencia de consumo parcial) para un tiempo t dado, y un proceso posible de error $e(t)$. La componente $a_i(t)$ se puede definir como una función por intervalos con solo dos posibles resultados:

$$a_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{si el aparato } i \text{ está prendido en } t \\ 0, & \text{otro caso} \end{cases} \quad \text{con } i = 1 \dots n$$

(3.14)

Este proceso de conmutación postulado por Hart modela el consumo de potencia de los aparatos individuales. La carga total es entonces el vector p que es la suma de los vectores individuales de cada carga para aquellos aparatos encendidos en cualquier punto del tiempo, es decir, que es una función del tiempo. Para $i=1\dots n$, entonces P_i será el vector p de la potencia del i-ésimo aparato cuando este opera.

Así también, es necesario estudiar el tipo de aparatos con los que podrían lidiar, sin caer aun en individualidades. Hart y sus colegas crearon una clasificación para ello: *ON/OFF*, *Finite State Machine (FSM)*, *Continuously Variable*. FSM es un modelo que permite detectar estados o propiedades de aparatos que con OFF/ON no se podría. Aunado a esto, haciendo un análisis de estados esquemático, ve la necesidad de establecer una restricción como **Zero loop-sum constraint (ZLSC)**, análoga a la Ley de Voltajes de Kirchoff (LVK).

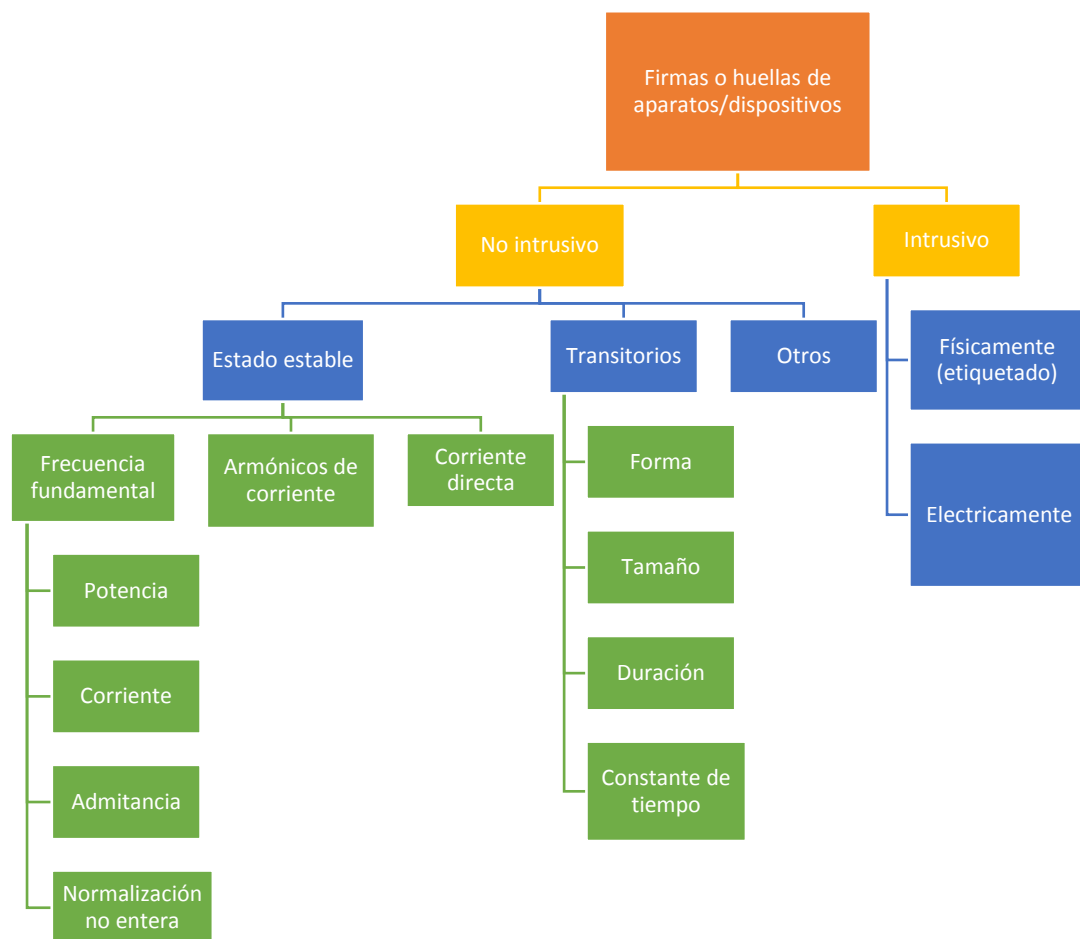


Figura 3-6. Clasificación de firmas según George Hart.

No solo trataron de caracterizar los tipos de aparatos a identificar, sino también, las firmas o huellas que podrían registrar de los mismos. La Figura 3-6, muestra como Hart ha clasificado las firmas según sus antecedentes o modos de generación y de análisis. Una firma no intrusiva es aquella medible por observación de cómo está operando una carga, de forma pasiva, como los

cambios en potencia. Hart establece que se basaron de forma importante en el panorama de **firmas de estado estable**, por tres razones: es más fácil detectar una situación presente y constante que una momentánea, cuando algo se apaga se genera un evento (muchos aparatos que generan un transitorio al inicio no generan uno al apagarse), se considera aditivo (y esto permite que varios eventos se analicen propiamente a la vez cuando la suma se recibe, y las propiedades de los transitorios no son aditivas).

Hart en su trabajo, es preciso y detallado con cada aspecto de la terminología que él consideró requerir, por lo que se exhorta al lector a referirse a la fuente para expandir cualquier concepto o detalle que le resulte interesante y que dado a que esta tesis informativa para un público amplio y diverso, no pretende detallar innecesariamente ni copiar.

Nótese en la figura, que se habla de firmas según la **frecuencia fundamental** (60 Hz), dentro de aquellas **no intrusivas**. Es decir, es posible medir potencia, corriente o admitancia de la carga total y observar cambios en paso de las firmas (*step changes*); esto puede complicarse cuando se asume que V es de hecho una función del tiempo y que hay una tolerancia nominal en la entrega de energía de alrededor de $\pm 10\%$. Como es usual en ingeniería cuando se tienen casos similares, se propone un modelo ajustado y se hacen observaciones de algunos resultados.

Menciona también las firmas según **armónicos de frecuencia**, como otra clase. Propone que alguna información adicional se puede obtener mediante este acercamiento, tomando en cuenta que casi todos los aparatos son no lineales. Habla de las propiedades armónicas de algunos electrodomésticos. Como otra propiedad habla de las firmas de DC y de las de transición y de otros tipos.

Hart explica la necesidad de diseñar el sistema partiendo de los principios de comunicación e información para modelar lo que vendría siendo el **canal de comunicación**, viendo los aparatos como **transmisores**, el cableado de la casa, el canal, las firmas y la codificación. Una de sus metas a plantear era diseñar un **receptor** para decodificar esos códigos.

Como se comenta, NILM desagrega la operación de cargas individuales de las mediciones de uso combinado de energía bajo el uso de múltiples cargas. En la Figura 3-7 se muestra el esquema que permite mediciones múltiples de

todas las cagas conectadas desde un punto central, propiedad característica de NILM.

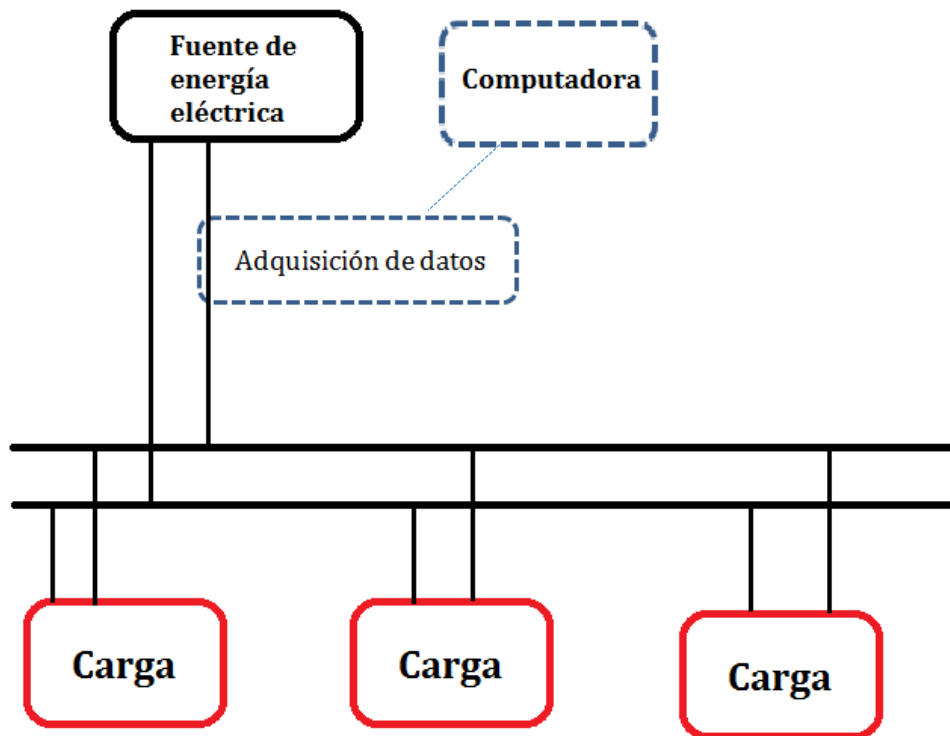


Figura 3-7. Disposición típica para ejecución de NILM en varias cargas. La adquisición de datos y el procesamiento ocurre en la locación central.

Como ya se comentó, se dice que es **no intrusivo** por el hecho de que no se realizan modificaciones a las cargas o mediciones en ellas, y no altera la percepción o experiencia en el usuario. Existen varios enfoques para ejecutar diagnósticos e identificación a través de monitorización no intrusiva; al igual que los métodos para desagregar varían, como se expondrá más adelante, pero en general, todos ellos pretenden usar los datos recolectados para determinar el estado general del sistema, incluyendo consumo de potencia real y reactiva producción armónica, etc. Una vez separadas, las firmas pueden ser analizadas individualmente.

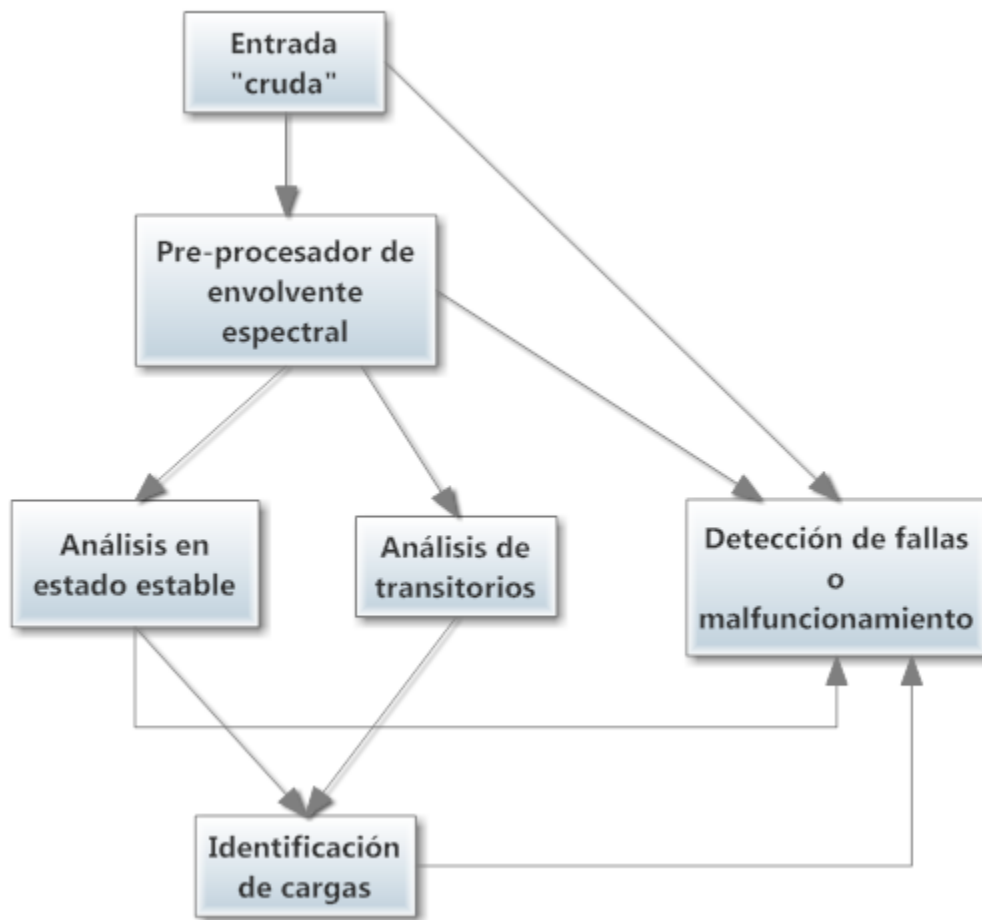


Figura 3-8 Diagrama de bloques de los procesamientos típicos en la mayoría de implementaciones de NILM, nótese como la etapa de diagnóstico de falla se alimenta con frecuencia de etapas previas.

Un diagrama de un flujo típico en el procesamiento de señales en NILM se muestra en la Figura 3-8. Como se ve, en general, los datos son primero pre procesados para crear envolventes espectrales de potencia. La envolvente espectral de potencia es una curva en el plano frecuencia-amplitud, derivada de magnitud de espectro de Fourier. Describe un punto en el tiempo, o siendo más precisos, una ventana.

Referente a la aplicación de la compañía eléctrica, un sistema NILM se conecta con la carga total usando medidores conectables o sensores de campo EM sin contacto para juntar los datos tales de V, I y P. Usa hardware simple, pero software complejo para el procesamiento de señales y análisis. Solo se somete a instrumentación a un único punto en el circuito, pero son los algoritmos

matemáticos los encargados de separar la carga medida en componentes separados.

La monitorización de cargas normalmente consiste de una secuencia de pasos de procesamiento de señales y análisis para poder conseguir la meta de detección de eventos, clasificación de los mismos, rastreo de actividad de aparatos y estimación de consumo de energía. La detección de eventos, también llamada detección de cargas, se refiere a la detección de cambios en los estados de ON y OFF de las cargas en un edificio o vehículo, en el sistema electromecánico. La meta es generar una alarma después de la aparición de un evento (De ON a OFF, o transiciones, por ejemplo), que podría habilitar la identificación del instante de tiempo cuando ocurre el evento ON/OFF.

Debemos, además, notar que varios aparatos contienen varias cargas individuales, como bloques. Como ejemplo, una secadora puede contener un motor de 120 V y algún elemento de calor termostáticamente conmutado a 240 V, controlados de tal forma que el motor esté en marcha mientras el elemento térmico está apagado, pero no al revés. La detección de cargas puede resultar en detectar transiciones de varios aparatos. Estas actividades detectadas serán clasificadas en los aparatos correspondientes en la etapa de clasificación de eventos. Los detectores convencionales usualmente requieren ajustes y entrenamiento periódico para apegarse al umbral de detección debido a la dinámica de cargas eléctricas, de forma que se consiga una probabilidad alta de detección y una tasa baja de falsa alarma. Esto impone varios límites en la precisión alcanzable del detector, reduciendo el uso práctico de un sistema NILM.

Respecto a otros usos y aplicaciones, recordemos que NILM es un conjunto de técnicas que conforman una tecnología de monitorización de cargas y de procesamiento y análisis de señales que pretende poder identificar aparatos individualmente en ambientes residenciales o comerciales, o diagnosticar los sistemas electromecánicos de, por ejemplo, un vehículo naval a través de monitorización continuo de los cambios en los estados de ON/OFF de varias cargas. Este es un ejemplo de muchos posibles, como veremos a continuación.

Ya que cada aspecto del comportamiento físico del sistema tiene que ver virtualmente de algún modo con el consumo de potencia, los datos

recolectados comunican información valiosa acerca de casi todos los sistemas monitorizados. Las **características medidas del consumo de energía** pueden ser usadas para aplicar modelos y hacer deducciones acerca del estado de las cargas. **Un uso típico de NILM es para identificación de cargas y programación**, donde la unicidad de los transitorios de inicio o del uso en estado estable puede ser usada para determinar que cargas están activas y en que instantes de tiempo lo están. También es útil para determinar fallas.

Una aplicación importante es **monitorizar los tiempos de operación y grado de desempeño de cargas mayores en sistemas electromecánicos**. NILM es una herramienta ideal para la tarea de automatizar el análisis de los datos de sensores mientras minimiza el número de sensores requeridos. Por ejemplo, la precisión de armónicas más altas tiene una relevancia en crecimiento porque pueden proveer medios para aislar los efectos de aparatos de velocidad variable cuando se hagan mediciones en ambientes modernos de calentamiento, ventilación y de aire acondicionado (HVAC).

En **aplicaciones comerciales**, tener conocimiento del consumo eléctrico y el tiempo de uso en edificios individuales es vital para los consumidores y las compañías eléctricas. Para los proveedores, esta información provee la **base de cobranza y pagos**, mientras que, para los consumidores, esta información ayuda a monitorizar y reducir el consumo en edificios. El uso de la carga eléctrica debido a los aparatos puede ser relacionado al comportamiento agregado de una persona individual, la cual típicamente exhibe una cierta periodicidad en tiempo en un número de escalas (diario, semanal, etc.) que refleje los ritmos detrás la actividad humana. De tal modo observamos que **NILM es una plataforma ideal para extraer información útil acerca del uso de electricidad, actividades humanas diarias**, y así, nos permite cambios potenciales del comportamiento del consumidor.

Otra aplicación importante que puede beneficiarse (y ya ha sido así en varias partes de Estados Unidos), es el **proceso de auditoría de edificaciones y el entrenamiento necesario para algoritmos NILM**. Esto es el proceso en el que los diversos equipos y sistemas en un edificio son evaluadas para asegurar que están operando de acuerdo con las expectativas de los dueños y diseñadores de edificaciones. NILM puede funcionar de forma sinérgica como una herramienta para apoyar la auditoría por medio de la obtención de perfiles de

carga individuales e indicadores de salud de equipo desde un único punto en el edificio, bajo la premisa de que varios de los sistemas que son evaluados durante el proceso de auditoría son energizados por electricidad, de tal forma que el consumo de potencia se vuelve una cantidad importante a monitorizar. Sus perfiles de consumo eléctrico son obtenidos por medidores de potencia que se instalan temporalmente en cada carga mayor.

Dado que el proceso de entrenamiento es usualmente uno de los obstáculos en el despliegue de tecnología NILM, se puede aprovechar el proceso de auditoría para este fin podría facilitar el procedimiento. Se presentan observaciones al respecto, basados primeramente en resultados obtenidos en un edificio residencial en Pittsburgh, PA donde se instaló un prototipo de sistema NILM.³⁴

Algo que el lector quizás pueda intuir, es que no resulta obvio, fácil o evidente el poder identificar de forma simple y barata a los dispositivos que usamos día a día (sin usar mediciones de alta frecuencia), dado que varios de los aparatos que usamos hoy consumen energía de formas distintas, dependiendo incluso de cómo están siendo usados.

La monitorización el consumo eléctrico en el hogar es una forma importante de reducir el uso de energía y las técnicas NILM son enfoques prometedores para obtener los estimados del consumo de potencia eléctrica de aparatos individuales de mediciones agregadas de voltaje y/o corriente en el sistema de distribución.

3.1.3 Caso California

NILM se ha desplegado en algunas cuantas partes del mundo, como edificios comerciales en California, un edificio experimental en Iowa, complejos comerciales en Massachusetts, unidades de la US Coast Guard y de la US Navy y algunos dormitorios del MIT, así como en un vehículo Chevrolet para pruebas de campo referentes a DC.³⁰ El estado de California en los Estados Unidos siempre ha sido un puntero en la innovación y nuevas tendencias tecnológicas, así como de investigación . Ejemplo de ello, el hecho de que un número dado de edificios en California están ya equipados con NILM. Estos

³⁴ “*Building commissioning as an opportunity for training non-intrusive load monitoring algorithms.*” M. Bergés, L. Soibelman., 2010.

aparatos capturan transitorios y monitorean el flujo de potencia, y este trabajo puede ayudar a NILM a mejorar su detección de fallas.

Pero es necesario comentar más acerca de los órganos que han tenido un papel en ello. Existen varios órganos importantes en Estados Unidos en esta materia, el **California Commissioning Collaborative (CCC)**, que define tres tipos de auditoría: aquel para nuevas edificaciones, la re-auditoría retrospectiva (a un edificio que ya ha pasado por ello antes), y la retro auditoría, para edificios existentes. En todos, existe una necesidad de medir el desempeño de equipo y los sistemas mediante la recolección de datos y análisis de estos, un proceso que ellos llaman “examinación funcional y monitorización” o auditoría basado en monitorización (MBCx en inglés). Sensores comerciales disponibles, registradores de datos y sistemas de administración en edificios son usados para la recolección de estos datos. El término de Sistemas de Información de Energía (EIS, en inglés), es utilizado generalmente para referirse a la colección de software y hardware usados para proveer información de energía de un edificio a las partes interesadas. Estas tecnologías se han usado por poco más de una década y varios estudios indican que tienen un efecto positivo en ahorro de energía durante la fase de operación de un edificio, así como el proceso de auditoría.

Tocando un poco de nuevo el tema de desregulación eléctrica, referenciando aquello sucedido en California (que para ese entonces aún estaba vigente), en el primer año de que se dio por completo la desregulación en California, el 90% de la carga conmutada ha sido carga industrial y comercial. Para servir mejor a estos consumidores de alto volumen, los proveedores y las compañías de servicios de energía buscaban formas de innovar y nuevos servicios. En ese entonces, en medio de la desregulación, los académicos y desarrolladores pensaron en una versión de NILM para mercados comerciales, que pudiera crear una plataforma una de variedad de servicios como: desagregación de la cuenta, tiempo de uso, precios en tiempo real, tasas de incentivos, alta resolución en la cuenta y diagnóstico de cargas. Si bien, como ya se trató, no fue un tópico exitoso, las ideas que se plantearon en su momento tenían validez y utilidad independientemente de ello.

Hablar de las entidades que han tenido que ver directamente con el desarrollo y despliegue de NILM es hablar de a organismos como **Electric Power Research Institute (EPRI)**, que es una entidad en California que ha

tratado a NILM como una cuestión de gran potencial de mercadeo. Steve Drenker es un ingeniero mecánico, con un certificado de cumplimiento de programa de ingeniería en telecomunicaciones, que laboró en el EPRI de Palo Alto, California y realizó estudios importantes de NILM, proponiendo mejoras en los procesos de análisis afinando las etapas de detección de bordes, análisis de grupos, pareo de grupos, resolución de anomalías e identificación de cargas.³⁵

El EPRI comisionó implementar y comercializar un sistema NILM basado en propiedad intelectual del EPRI; una empresa llamada *Enetics* bajo el rigor de la EPRI, ofreció hardware y software para NILM. La electrónica de NILM se conecta a la carga total en un único punto, usualmente la entrada del servicio eléctrico y usando un adaptador de extensión conectado al socket estándar del medidor. No es necesario acceder directamente a los aparatos para instalar sensores o hacer mediciones, como se ha comentado, esto permite una fácil instalación de sensores, así como su remoción y mantenimiento, en contraste con técnicas convencionales de monitorización de cargas intrusivas que requieren submedidores y cableado interno. En 1996, antes de comercializar el producto, EPRI financió una prueba beta. Se usaron varias casas donde se instalaron tanto NILM como equipo de medición multicanal, para fines de medición de desempeño. Se vio que el hardware de NILM era demasiado fácil de instalar y el software cumplía su propósito. Tras mostrar unos resultados, se concreta el hecho de que el producto ha estado disponible desde 1996. Curiosamente documentos y trabajos recientes hacen poca o nula referencia a este hecho. Es probable que, siendo un trabajo de 1999, haya visto un cese de la maquila del producto (sólo hay 3 años de diferencia entre dichos sucesos y la publicación de las fuentes). Dado un supuesto éxito, desarrollo, experimentación y comercialización del producto a nivel residencial, combinado con la desregulación de las *electricity utilites* en varios estados, se llevó al desarrollo del producto a nivel de edificios comerciales (restaurantes, moteles, hoteles). En 1998, la EPRI lanzó una prueba beta para probar el prototipo comercial. El objetivo era desarrollar por completo y brindar al mercado un sistema NILM comercial (C-NILM), Participaron 3 servidoras eléctricas, con C-NILM operando en cuatro sitios comerciales. Las metas de este incluyen: validar dos versiones de hardware registrador, mejorar los algoritmos y el software, desarrollar bibliotecas de

³⁵ “*Nonintrusive Monitoring of Electric Loads*”. Steven Drenker, Ab Kuder, 1999.

cargas comerciales. Al igual que en el modo residencial, se hacen mediciones en paralelo para medir desempeño.

Empresas como *Intel* y *Belkin*, fueron las primeras en ofrecer productos basados en NILM.

3.1.4 Caso USC

En este apartado trataremos el tema de los conjuntos de datos (*datasets*) que se han generado para el estudio de NILM, especialmente los que fueron utilizados en mi experiencia académica en *University of Southern California*. La academia y la industria han producido varios, pero típicamente es la academia la que los pone a la libre disposición de la comunidad para que puedan realizar sus propias pruebas y análisis. Otras veces es necesario contactar al académico a cargo y solicitar autorización, como lo fue en este. Vale la pena mencionar que el *dataset* con el que se trabajó y experimentó, fue **BLUED**, que se explicará más adelante, cuyo titular es el Dr. Mario Bergés³⁶, uno de los más grandes exponentes en el tema hoy en día. La configuración y contenido de este *dataset* se explicará más adelante. Como dato curioso, uno de sus *papers* más relevantes en el tema, me fue proporcionado incluso antes de su fecha oficial de publicación.

En general y en su versión más simple un conjunto de datos corresponde a los contenidos de una única tabla de base de datos, o una única matriz de datos estadística, donde cada columna de la tabla representa una variable en particular, y cada fila representa a un miembro determinado del conjunto de datos en cuestión. Un conjunto de datos contiene los valores para cada una de las variables, como podrían ser la altura y el peso de un objeto, que corresponden a cada miembro del conjunto de datos. Cada uno de estos valores se conoce con el nombre de dato. El conjunto de datos puede incluir datos para uno o más miembros en función de su número de filas. La publicación de los conjuntos de datos usados en un experimento son clave para su reproducibilidad, y cada vez son más las leyes públicas y normas de revistas científicas que obligan a hacerlos públicos, para evitar sesgos. Dependiendo del estudio, es un factor clave las propiedades del conjunto: dispersión, curtosis, etc.

³⁶ <http://www.marioberges.com/blog/wp-content/uploads/2009/12/mberges-CV.pdf>

Muchos tipos de conjuntos de datos se han usado en el análisis estadístico de fenómenos. Como se ha visto, NILM es un conjunto de técnicas que se pueden someter al estudio de lo planteado por el procesamiento estadístico de señales (ejemplo, tratamiento de series de tiempo).

Típicamente se manipulan en formatos de tabla, como el popular XLS, pero también es muy común procesarlos como valores separados por comas (CSV). Sin embargo, no son los únicos formatos existentes.

El primer *dataset* importante fue **Reference Energy Disaggregation Data Set (REDD)**, describe el software, hardware, las decisiones hechas, enfoques anteriores y presentación de resultados usando la muy conocida técnica de Factorial Hidden Markov Model (FHMM).

Los autores de este trabajo (J. Zico Kolter, Matthew J. Johnson)³⁷ mencionan cosas que parecen ser tomadas de otros documentos similares, agregando la escasez de los combustibles fósiles y cómo es necesario investigar alternativas. Se apela a la sustentabilidad, pero hay situaciones claves en ello: análisis de datos y tareas de predicción; aquí la minería de datos y el aprendizaje en máquinas se vuelven invaluable. Es importante que existan *datasets* con la información necesaria que estén públicos para la comunidad de investigación, lo cual no suele ser así.

La señal base del *dataset* es una señal agregada a nivel de vivienda completa y específica en materia de aparato/dispositivo, aplicado a varias casas por varios meses. Se registró a 15 kHz, hasta 24 circuitos individuales en una casa, cada una etiquetada según su tipo de aparato. Hasta 20 monitores a nivel de plug registrados a 1 Hz. Para Junio 2011, se tenían –entre todas las casas- 119 días de datos, 10 casas monitoreadas, 268 monitores únicos y 1 TB de datos crudos. Esto puede ser públicamente encontrado en: <http://redd.csail.mit.edu>.

Se puede inferir que hablar de desagregación de energía es equivalente a hablar de NILM, con el cual se puede conseguir información útil que puede mejorar la eficiencia hasta un 15%. Algo concreto que se puede lograr con

³⁷ “REDD: A Public Data Set for Energy Disaggregation Research”, J. Zico Kolter, Matthew J. Johnson, 2011.

NILM es empujar el entendimiento y la conciencia del uso de los recursos energéticos, en este caso, electricidad. En la figura 3-9 se muestra como configuraron las pruebas dentro de la vivienda.

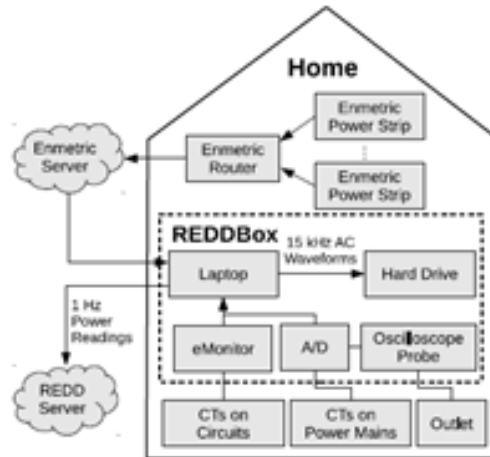


Figura 3-9 Diagrama esquemático de los autores del dataset REDD³⁷

El segundo *dataset* analizado, **BLUED (Building-Level fully-labeled dataset for Electricity Disaggregation)**, consiste de mediciones crudas de voltaje y corriente en una unidad residencial en Pittsburgh, PA, muestreado a 12 kHz durante una semana completa. Cada cambio de estado en esta casa se etiquetó y se registró en tiempo, lo que da la referencia base para el trabajo restante. Estos eventos están muy relacionados con cambios en el consumo de potencia.

En general, existen dos paradigmas de desagregación de la energía para NILM: basado en eventos y no basado en eventos. Este último trata de separar los componentes de la señal general (e.g. consumo de potencia) usando técnicas como modelos de variable latente, separación de fuentes a ciegas, o técnicas de series de tiempo (referirse a *REDD: A Public Data Set for Energy Disaggregation Research*² para más detalles de este modo). Los basados en eventos llevan registro del estatus de cada aparato, para fines de detección y clasificación.

En la casa había alrededor de cincuenta aparatos eléctricos, y la idea era llevar registro de la operación eléctrica de cada uno, como cuando apagan o prenden. El documento procede a hacer un análisis cubriendo los siguientes tópicos: mediciones, valores de referencia (*ground truth*), post-

procesamiento, retos dentro de los datos del dataset, sumario del dataset, resultados, etc.

Acerca de las mediciones, se reitera que las residencias normalmente tienen una distribución de energía basada en un alambre de 3 filamentos, con una única fase de 240 V/120 V donde la única fase primaria está en un punto central en el transformador para crear dos fuentes de 60 Hz a 120 V y una neutral. La diferencia entre las fases de los dos 'cables' generados es de 180°, y ellas son fase A y B. Se asume que las señales de voltaje son copias desfasadas entre ellas (por medio ciclo) y solo se muestreó una señal de voltaje y una corriente a 12 kHz. Se calculó el consumo total con base en estas mediciones.

Acerca del post-procesamiento, se explica que se basaron en el Capítulo 2 de *Electric Load Information System based on Non-intrusive power Monitoring (PhD thesis)* de Kwangduk Douglas Lee (MIT) para hacer el cómputo del consumo de potencia a partir de la corriente y voltaje medidos; este cómputo de la potencia activa se hizo a 60 Hz (publicados). Definen 'evento' como cualquier cambio en consumo de potencia mayor a 30 W y que dure al menos 5 segundos.

Se tuvieron finalmente 2,355 eventos etiquetados en el *dataset*, pero después de una inspección de actividades no etiquetadas, concluyó en: 2,482 eventos (904 en fase A, 1,578 en fase B), con 127 eventos de fuentes desconocidas. Acerca de los retos dentro de los datos del *dataset* se habla de los problemas que fueron surgiendo que se debieron solucionar, como rastrear la circuitería de la casa hasta problemas de Internet. Además, que sus sensores para medir corriente tenían una frecuencia de corte de aprox. 300 Hz, lo que implica que las señales muestreadas, incluso a 12 kHz, solo darían información hasta la 5ª armónica de corriente.

Por otro tipo de cuestiones, se dieron cuenta que una semana no es suficiente para un verdadero *dataset* demostrativo (la casa tenía aparatos que nunca se usaron). Hay más aparatos conectados a fase B, aunque un refrigerador en fase A es representativo en un histograma. Hicieron un algoritmo de detección con base en GLR (*generalized likelihood ratio*, por sus siglas en inglés).

Para probar el desempeño del sistema se recolectaron los datos de referencia (*ground-truth*), que consistieron en series de tiempo de una vivienda completa de sus mediciones de potencia con etiquetas asignadas a cada muestra que caía cerca (en tiempo) a cuando ocurría una transición de estado en algún equipo. Dada la dificultad en la obtención de etiquetas, se valieron de datasets creados manualmente para obtener los resultados: para cada dataset los autores invirtieron dos o tres horas en el edificio registrando manualmente las estampas de tiempo para cada transición de aparato que ocurriera durante cierta cantidad de tiempo, pues identificar exactamente cuando un aparato cambiase de estado era una premisa complicada. Se reitera que la intención de los autores es darle al lector una idea general de como la tecnología en referencia se desenvuelve.

En los experimentos que se llevaron a cabo, los autores usaron un umbral de 300 Watts, pero se podría realizar una búsqueda de parámetros. No hacen aseveración en pos de una supuesta superioridad del detector GLR para el enfoque de NILM basado en eventos. El propósito de su trabajo es proveer un conjunto de métricas para la evaluación y comparación de algoritmos de detección diferentes uno contra otro. Se usa el detector GLR como un algoritmo de detección simple para ilustrar la validez de las métricas que se proponen.

Acerca del *dataset*, como parte de los continuos esfuerzos de reunir los investigadores que trabajan en NILM, su grupo de trabajo recientemente liberó el *dataset* BLUED, que comprende una semana de voltaje y corriente agregados, colectados a 12 kHz para ambas fuentes de voltaje en el panel de electricidad de fase dividida en una casa en Pittsburgh, PA. Está disponible para la descarga de cualquiera que lo desee.

En el apéndice final se muestra la presentación, presento las diapositivas del trabajo final que fue expuesto en USC ante una comitiva académica de ésta universidad y otra de la UNAM, encabezada por el profesor Jesús Manuel Dorador González, en el verano de 2012. Lo más relevante de este trabajo fue poder identificar los comportamientos de diferentes aparatos de casa pudiendo verificar que era posible poder detectar e interpretar estas formas de onda para poder mejorar el consumo, con técnicas que comentan más adelante, como Smart Grids, Internet de las Cosas (IoT), etc.

3.2 Smart Grids & IoT

Un sistema de Smart Grid (SG) es un sistema complejo que conecta múltiples componentes físicas, como componentes humanas, cuestiones climatológicas, plantas de energía y también, componentes lógicas como algoritmos de control, infraestructura de consumiciones y protocolos. El gran número de componentes e interacciones entre las componentes individuales tiene una influencia marcada y delicada en el comportamiento de todo el sistema en general. La detección de anomalías en el sistema requiere un gran número de observaciones, lo cual no acaba siendo práctico. A finales de los años 2000 y a principios del 2010 se empezaron a desarrollar diversos novedosos esquemas de trabajo y análisis, basados en estimaciones y procesos aleatorios (también llamados estocásticos) entre otros recursos de probabilidad y estadística, como la teoría de aproximación³⁸, *wavelets*, procesos de Markov, funciones de máxima similitud, entre otros. Así pues, valerse de técnicas de TI y telecomunicaciones para la transmisión de esta información. La figura 3-10 da una idea conceptual de la coexistencia de SG con diversos entornos y entre sí:

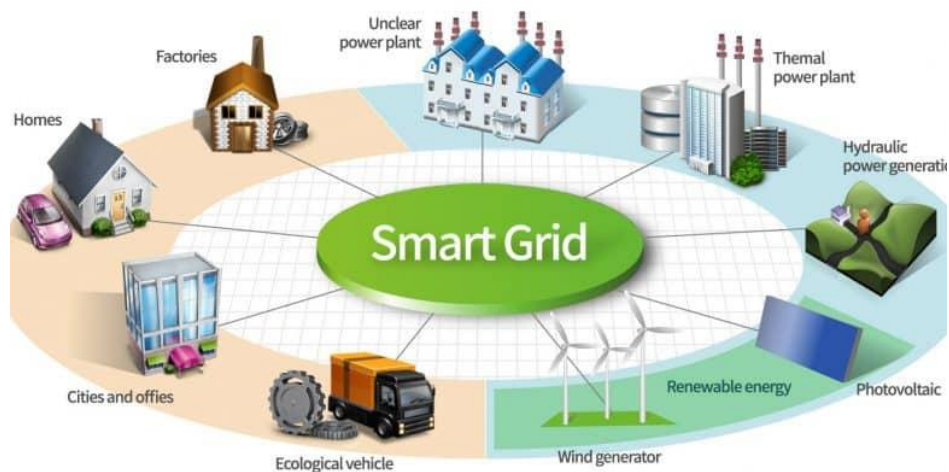


Figura 3-10. Esquemático conceptual de SG³⁹.

Por otro lado, IoT está proyectado a crecer a 50 mil millones de dispositivos conectados para 2020⁴⁰. Esto proveerá información valiosa a los consumidores, fabricantes y proveedores de suministros. Dentro del

³⁸ “Fast anomaly detection in SmartGrids via Sparse Approximation Theory”, M. Levorato, U. Mitra. 2012

³⁹ <https://www.technocracy.news/wp-content/uploads/2018/04/Smart-grid-infographic-777x437.jpg>

⁴⁰ “A smarter grid with Internet of Things”, O. Monnier para Texas Instruments. 2013.

marco de IoT, los dispositivos de diferentes sectores e industrias estarán conectados a través de Internet y conexiones punto a punto, así como también redes cerradas, como las que se usan en la infraestructura de SG.

3.2.1 Conceptos y teoría

La necesidad de un cambio en los hábitos de producción de energía y los modelos de consumo de la misma marcada por retos ambientales y sociales está generando un gran esfuerzo en investigación para mejorar las redes de suministro inteligentes del futuro, es decir, las SG. Edificios inteligentes y control de cargas, mercados energéticos y producción de energía reusable hacen que un sistema SG tenga un comportamiento extremadamente dinámico y complejo. Una de las vertientes posibles es la masificación de la implementación de redes de sensores para proveer mediciones y estaciones de control distribuidas sobre la red. Entonces, una red SG es sistema muy grande y amplio, interconectando millones de entidades inteligentes que, producen, venden, consumen y monitorizan la red de suministro, tomando decisiones de forma activa. Garantizar que el sistema sea robusto y confiable, bajo una naturaleza compleja y heterogénea, es un reto tecnológico destacable.

Se requiere de una pronta detección de anomalías para permitir que existan las acciones de control apropiadas y evitar fallas en la red. Los análisis tradicionales y los algoritmos de estimación por sí solos no pueden lidiar con la enorme complejidad de un sistema de SG y fallarían al intentar proveer identificación oportuna especialmente cuando se considera el comportamiento tan complejo del sistema.

Un sector local de la red se suele considerar como aquel donde los sitios de producción están interconectados con cargas inteligentes (típicamente edificios residenciales y comerciales) por líneas de transmisión y distribución. Las plantas basadas en combustibles fósiles tienen un perfil de producción tal que se suele planificar su operación con un día de adelanto. La energía producida por sitios de producción de energía renovable es una función de factores climáticos locales, como la fuerza del viento y la iluminación solar. Las cargas inteligentes son edificios inteligentes cuyo consumo de energía es controlado por sistemas autónomos que determinan la activación de aparatos por sistemas automatizados en el edificio, con base en decisiones del

consumidor, así como también de sus hábitos, clima y costos del servicio. Se instalan medidores inteligentes (*Smart meters*) además de sensores para proveer mediciones y datos a las estaciones de monitorización y control. Se usa un modelo estocástico basado en predicción para poder calcular la función de valor descontado (*discounted value function*). Ésta función de valor captura el costo promedio a largo plazo, que está asociado con la probabilidad de que el sistema pueda alcanzar estados de alto costo.

En los términos más simples, construir una red SG significa asegurar el futuro del suministro de energía para todos, en un contexto de crecimiento de población acelerada con una capacidad limitada de producción de energía. Al usar SG, se puede lograr reducir las pérdidas, incrementar la eficiencia, optimizar la demanda y distribución y también permite darle mayor credibilidad, fuerza y rentabilidad a fuentes renovables como la solar y eólica. Con una infraestructura que sigue envejeciendo, la red de suministro se enfrenta a varios retos como apagones recurrentes en ciudades más industrializadas alrededor del planeta, más del 30% de pérdida de producción a hogares en la India y 35% de agua despreciada en fugas en Australia y Francia.⁶⁰

La topología necesita adaptarse y cambiar del esquema centralizado a una topología distribuida que pueda absorber diferentes fuentes de producción de forma dinámica. Existe entonces, una necesidad real de registrar consumo en tiempo real y la demanda a la fuente: esto requiere el despliegue de equipo remoto (sensores) capaz de medir, monitorizar y comunicar la información que se pueda usar para implementar una red que se cuide sí misma, incrementando la eficiencia general y los grados de libertad del sistema en términos de auto monitorizado y la toma de decisiones. Una red SG conectada provee una red de comunicación que eventualmente conectará todos los dispositivos orientados al tema energético. Desde la transmisión y la infraestructura de distribución de potencia, sistema eléctrico, de agua, gas, climatizado y edificios automatizados, diversas empresas han puesto atención a este problema y han desarrollado opciones para enfrentar estos retos.

Para alcanzar las metas del futuro, también se dice que SG debe cumplir los siguientes requisitos⁴¹:

⁴¹ “*The New Frontier of Smarter Grids*”, Xinghuo Yu, Carlo Cecati. 2011

- Control distribuido: el control requiere ser distribuido, permitiendo necesidades de comunicación más simples si componentes de la red como fuentes, cargas y unidades de almacenamiento pueden controlarse localmente o que sean capaces de tomar algunas decisiones por sí mismos.
- Predicción de la demanda: es algo que ya existe a nivel de transmisión, pero apenas ha comenzado su inclusión en distribución; se trata de estimar la demanda en cualquier porción de la red con algunas horas o días de adelanto.
- Predicción en la generación: la generación puede estimarse, principalmente para energías renovables como solar o eólica. Estas estimaciones dependen mucho de predicciones climáticas y son indispensables para poder tener la capacidad de programar el uso de fuentes no renovables por las proveedoras de servicio integrando fuentes de energía intermitentes.
- Respuesta a la demanda: reducir los picos de demanda es esencial para lograr una red más eficiente. Mecanismos como precios dinámicos pueden ayudar a reducir la demanda total. Otro posible beneficio de reducir los picos de demanda es poder apuntar hacia el suministro automático, que consiste en retardar el uso de ciertas cargas con el tiempo.

Por otro lado, IoT, por escala de implementación, puede clasificarse como se muestra en la figura 3-11⁴¹:

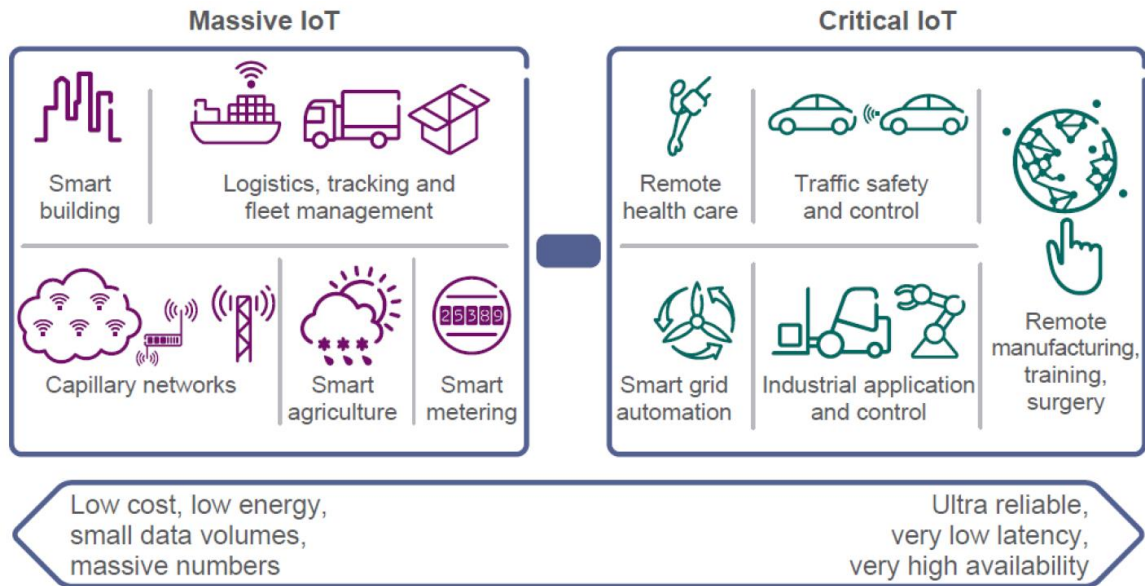


Figura 3-11. IoT por su implementación

3.2.2 Convergencia de Smart Grids con NILM, IoT

El grueso de la red eléctrica tiene más de 100 años de edad y aunque ha servido bien, es innegable que necesita verse beneficiada de las nuevas tecnologías disponibles, sin tener que depender exclusivamente de un incremento regulatorio ambiental. Hay proyecciones de incrementos en la eficiencia de un 9% para 2030, ahorrando más de 40 mil millones de kilowatt-hora cada año, que se puede traducir en ahorros cerca de 40 mil millones de dólares en un año⁴². Una de las componentes más importantes en este esquema, como se ha mencionado, es el poder ser eficiente, por lo que se requiere medir y reportar de forma *inteligente*.

Un *Smart meter* es un dispositivo electrónico capaz de registrar el consumo de energía que envía a la central de monitorización, como ya se comentó. Estos dispositivos habilitan una comunicación de dos vías entre el sistema central y el medidor, aplica a diversos tipos de energía. Lo que los separa de sensores que han existido desde hace mucho tiempo, es su capacidad de registro en tiempo real o muy cerca a tiempo real, notificaciones de corte, monitorización

⁴² <http://www.whatissmartgrid.org/smart-grid-101>

de calidad de potencia, entre otros atributos. La base de *smart meters* instalados en Europa al final de 2008 era de 39 millones de unidades.⁴³



Figura 3-12. Contraste de medidores clásicos contra inteligentes.

EL término IoT es un término acuñado por Kevin Ashton en 1999, un pionero tecnológico inglés que trabajó con la identificación por radiofrecuencia (RFID), que concibió un sistema de sensores ubicuos que conectasen al mundo físico con el de Internet. Aunque las componentes centrales de IoT son las cosas, el internet y la conectividad, el valor del concepto radica en cerrar la brecha entre el mundo físico y digital, con sistemas que se puedan reforzar y mejorar a sí mismos. IoT promete conectividad de todo en cualquier lugar (*everything, everywhere*). Se proyecta que para 2020, cerca de 50 mil millones de dispositivos estarán conectados a la nube.⁴⁴ Como complemento ilustrativo, se presenta un ejemplo de arquitectura de un *Smart meter* real en la figura 3-13.

⁴³ “5G/IoT and Smart Energy Applications”. Celplan, 2017.

⁴⁴ https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf

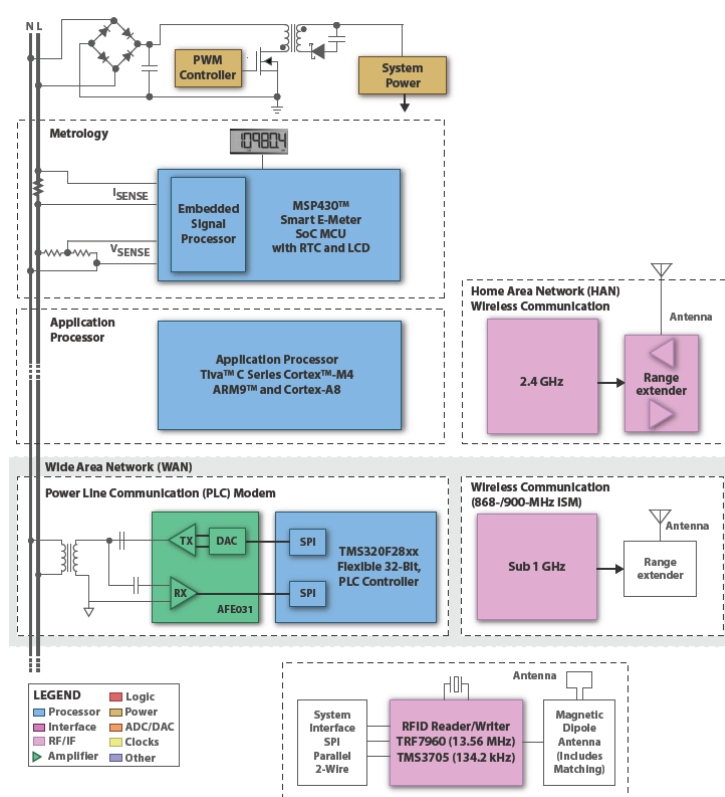


Figura 3-13. Ejemplo de un Smart meter de Texas Instruments que soporta diversas opciones de conectividad⁴⁰

La idea radica en que IoT está directamente relacionado con el concepto de comunicaciones tipo máquina M2M (*Machine to Machine*, por sus siglas en inglés) lo cual significa poder tener múltiples dispositivos conectados en esquema de baja potencia y de baja tasa de transmisión, a veces usando tecnologías de banda estrecha para permitir mejores ciclos útiles de batería y mayores áreas de cobertura.

Todos estos dispositivos van a generar una gran cantidad de datos, información y datos, así como también servicios que mejorarán la toma de decisiones, y que tendrán un impacto en la calidad de vida.

IoT tiene muchas aplicaciones, que se pueden segmentar en:

- a) Agricultura y pesca
- b) Servicios de inmuebles y edificios
- c) Usuarios y consumidores
- d) Energía
- e) Empresariales

- f) Ambiental
- g) Salud
- h) Industrial
- i) Servicios públicos
- j) Residencial
- k) Venta al por menor
- l) Infraestructura y seguridad nacional
- m) Ciudades inteligentes
- n) Rastreo
- o) Transporte y vehicular
- p) Servicios

En la figura 3-13 se observa un hogar conceptual donde vemos como coexisten diversos *Smart meters*, orientados a diversos servicios o tipos de energía origen y como convergen entre ellos en un contexto de comunicación unificado respecto a un sistema SG.

Como sabemos que la eficiencia es una meta, así como mejorar el aprovechamiento y la experiencia del usuario al gestionar inteligentemente la demanda, es imperativa la necesidad de técnicas no intrusivas para realizar las tareas de monitorización y respuesta, es ahí donde aplicar técnicas NILM hace sentido, ya que se requiere desagregar la información de consumo eléctrico en inmuebles, basados en el menor número de mediciones posibles (incluso, a veces sólo una). Como ya se comentó cuando se habló de NILM, la desagregación de consumo pretende separarlo con respecto a dispositivos individuales (cargas). Las técnicas NILM están teniendo cada vez más auge en giros como *Home Energy Management Systems (HEMS)*, *Facility Management (FM)*, *Ambient Assisted Living (AAL)*, entre otros⁴⁵, donde la habilidad de poder determinar el estado de encendido o apagado de ciertos dispositivos puede proveer información clave para la toma de decisiones. En la figura 3-14 se muestra una imagen conceptual de SG relacionado a IoT:

⁴⁵ “NILM Techniques for Intelligent Home Energy Management and Ambient Assisted Living: A Review”. A. Ruano, 2019.

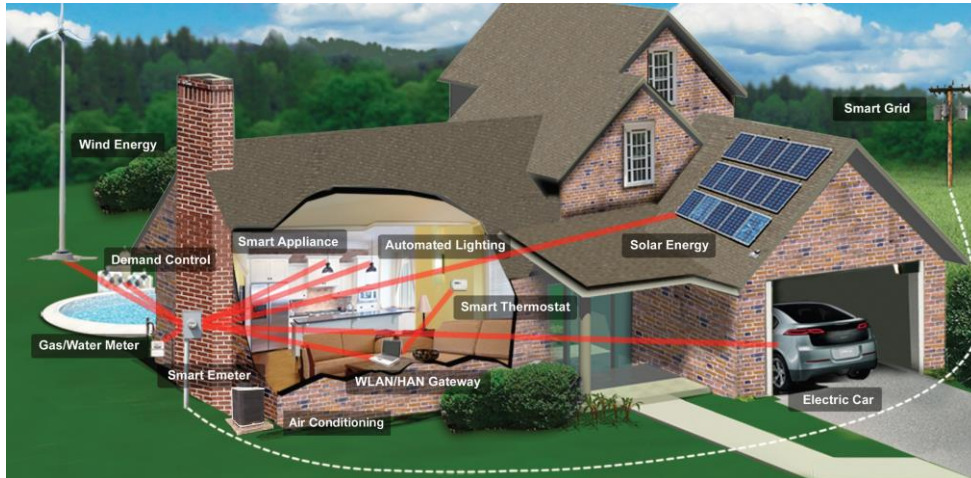


Figura 3-14. Conectividad basada en SG habilitando servicios inteligentes domésticos basados en IoT⁴⁰

El incremento del uso de técnicas NILM se ha visto causado también por el auge de IoT, SG, y otros proyectos relacionados con respuesta a la demanda, donde la información que se obtiene con NILM puede ser útil para futuros desarrollos también. La mayoría de las aplicaciones basadas en NILM reportan información a los encargados o administradores para poder reducir su consumo. Como ya se comentó, NILM es no intrusivo, o lo menos intrusivo posible y éste enfoque es fácil de implementar incluso si ya existen *Smart meters* desplegados.

NILM ha probado ser también útil en los sectores de salud y cuidado, que pueden ayudar a personas de edad avanzada o problemas importantes de salud vía HEMS y AAL, donde se puede tener monitorización de la vivienda donde radique una persona que caiga en esos casos, así también, de los sensores biométricos que estén vinculados a esta persona.

Aun bajo estos nuevos esquemas de aplicación, las cuatro directivas de NILM se mantienen:

1. Recolección de datos
2. Detección de eventos
3. Extracción de propiedades
4. Identificación de cargas

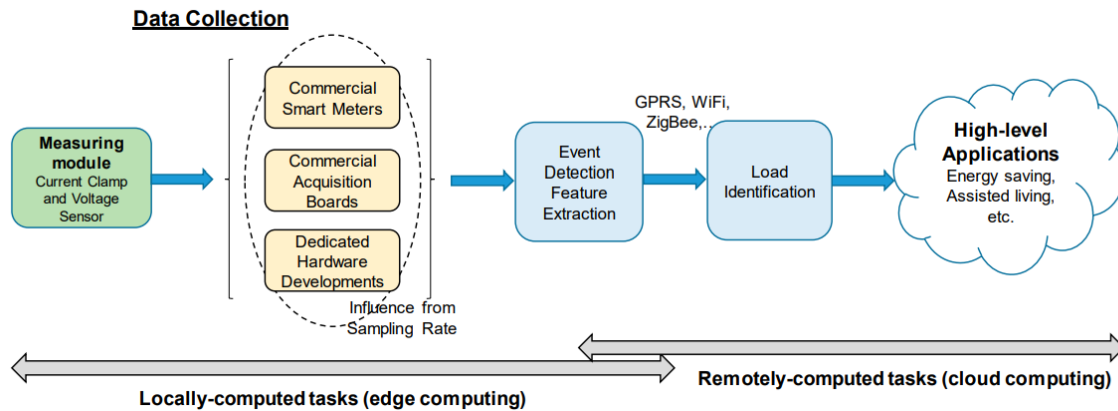


Figura 3-15. Vista general de los diversos aspectos en el proceso de recolección de datos con NILM⁴⁵

La adopción de *Smart meters* inició con el sector eléctrico, pero ha sido rápidamente aceptado por industrias de gas, agua, calefacción, entre otros. Para 2017, se estima que se triplicó la cantidad de *Smart meters* instalados, llegando a 29.9 millones, a nivel mundial⁴⁷. En la figura 3-15 se muestra como fluyen los diversos procesos de NILM, cada uno dependiendo del anterior.

3.2.3 Actualidad

De acuerdo a GSMA (*GSM Association*, que es una entidad que representa los intereses de los operadores móviles en el mundo)⁴⁶: “*Internet de las Cosas (Internet of Things - IoT) ofrece una oportunidad extraordinaria para América Latina. Según GSMA Intelligence, el potencial de ingresos totales para la región hacia el año 2023 es de USD 33 mil millones. Sin embargo, el impacto general en el PBI será probablemente mucho más significativo. Tan solo para Brasil, McKinsey pronostica que el impacto de IoT hacia 2020 será de al menos USD 50 mil millones en el PBI del país.*”

Estamos en el *boom* del despliegue de dispositivos basados en IoT, y es algo que los formuladores de políticas públicas deben tener en cuenta para lograr reconocer las necesidades y el potencial que tiene abrirle paso, estimando el impacto positivo en varios ámbitos económicos relacionados con IoT para después poder crear y aplicar las acciones puntuales para facilitar este desarrollo. Es un tema moderno a la fecha de la redacción de ésta tesis, con mucha relevancia en la industria y en países de América Latina, pues se ha comenzado a valorar las grandes posibilidades, beneficios y ventajas que se

⁴⁶ <https://www.gsma.com/latinamerica/wp-content/uploads/2018/11/IoTGuide-ESP-NOV-DIG.pdf>

pueden conseguir, como una flotilla de vehículos completamente automatizada, monitorización en tiempo real, como se ha comentado, etc. IoT es sin duda, una de las herramientas que permitirán una evolución significativa en diversas industrias y proveedores de servicios, así como la experiencia en los hogares. El impacto positivo de IoT a diversos sectores incluye beneficios en temas de salud y el bienestar colectivo, reduciendo costos y la huella de carbono con las cuestiones de SG. La oportunidad de ingresos totales para América Latina hacia 2023 es de 176 mil USD de los cuales 82 mil USD serán de IoT mismo.⁴⁶

De acuerdo a datos de la consultora *Frontier Economics*⁴⁷, se estima que un aumento de 10% en las conexiones M2M tendrá un impacto en incrementos anuales cercanos al 0.7% en el PIB. Este estudio se basa en información obtenida de la OCDE, que incluye países como México. Véanse las siguientes figuras 3-16 y 3-17 relacionadas con el impacto de IoT en América Latina, proveídas por la GSMA⁴⁶:

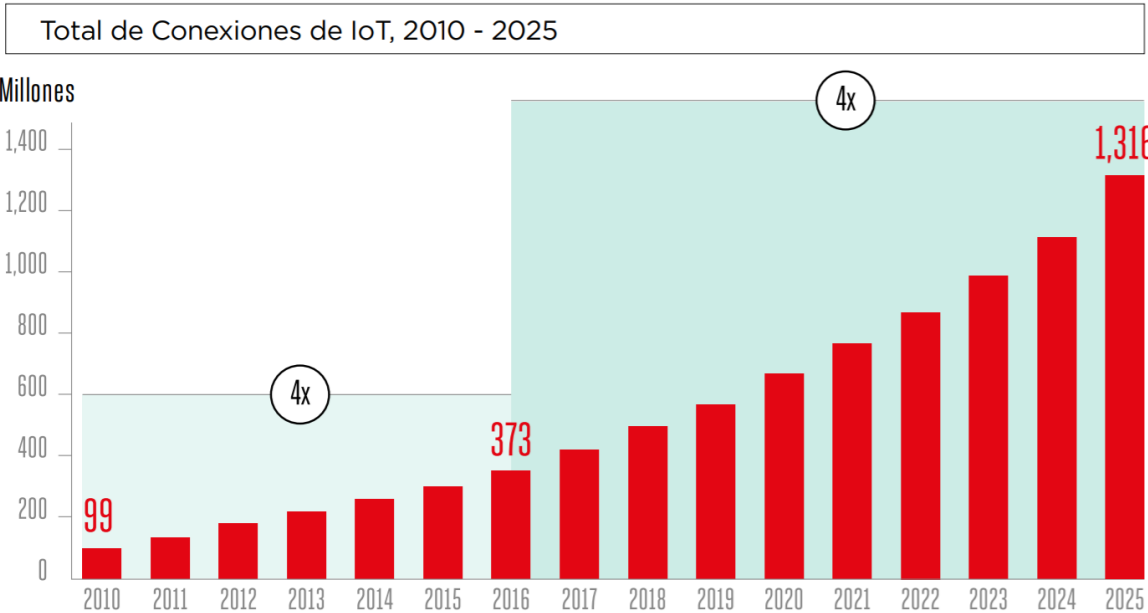


Figura 3-16. Fuente: GSMA

⁴⁷ https://www.frontier-economics.com/media/1167/201803_the-economic-impact-of-iot_frontier.pdf

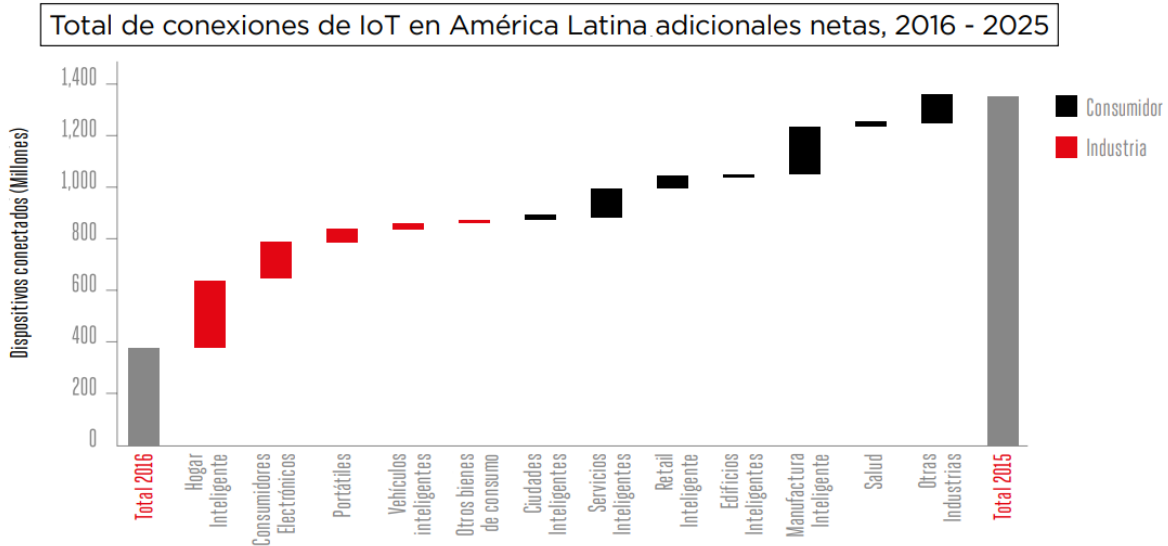


Figura 3-17. Fuente: GSMA

Países como Brasil han sido punta de lanza en la estrategia y buenas prácticas de IoT, donde desde 2014 el gobierno creó un foro permanente sobre temas de IoT y M2M para la colaboración entre sector público y privado teniendo como directrices:

1. Reconocimiento
2. Priorización
3. Implementación

De forma que se puedan reconocer los desafíos, definir las prioridades y las estrategias de aplicación.

En términos de acceso al medio y tecnologías que facilitan la convergencia entre IoT, SG y NILM, tenemos los casos como Estados Unidos y China, que han puesto atención a las bandas Sub-1 GHz para mejor rango y mayor penetración, con visión a ciudades inteligentes (*Smart cities*).

Del mundo de la normalización, ha sido necesario generar esfuerzos para asegurar la interoperabilidad y homologación entre distintos fabricantes. Por ejemplo, España usa técnicas basados en OFDM para sus comunicaciones en la red eléctrica, conocido como *PRIME Alliance*⁴⁸. Otros países como Holanda, Francia y Japón usan estándares similares como *G3-PLC Alliance*.

⁴⁸ <https://www.prime-alliance.org/>

En temas de RF, Reino Unido ya emitió su segunda versión de especificaciones técnicas sobre IoT y Smart Grids, conocida como *SMETS (Smart Metering Equipment Technical Specification)*⁴⁹, donde se trabaja con bandas en 2.4 GHz y 868 MHz, con tecnologías como ZigBee propuesta como la aplicación para medidores de fase.

En general, a nivel europeo, existe la plataforma *Smart Grid European Technology Platform*⁵⁰, para organizar las políticas al respecto en la región, y en Estados Unidos por *42 U.S.C. ch. 152, subch. IX § 17381*⁵¹.

En 2017 en Caraguatuba, Brasil, se iniciaron los esfuerzos para cambiar todo su alumbrado público por bombillas LED inteligentes para ser monitorizados por el gobierno local. En Colombia, por ejemplo, se está trabajando en ciertos municipios para traer iluminación inteligente que se atenúen de acuerdo a la temporada, hora y densidad peatonal, incluso enviando alertas de mantenimiento sobre posibles fallas.

Actualmente, Barcelona es una de las ciudades con mayor penetración de estos paradigmas, por lo que se le puede considerar un proyecto avanzado hacia una ciudad inteligente, siendo de los más avanzados en Europa incluso. Esto ha sido posible porque Barcelona designó un responsable para este proyecto, debiéndose coordinar con diferentes entidades y áreas para poder definir una visión estratégica a corto, mediano y largo plazo para la ciudad. Esto también ha sucedido en países de vanguardia como Singapur.⁴⁶

3.3 Medición de la calidad de servicio (QoS) en banda ancha fija y móvil

En México, el Instituto Federal de Telecomunicaciones⁵² tiene publicado lo siguiente al respecto: *Un servicio de telecomunicaciones y radiodifusión es de calidad cuando cumple con los parámetros establecidos por el Instituto, y satisface las necesidades del usuario del servicio.*

El Instituto Federal de Telecomunicaciones es la autoridad encargada de

⁴⁹ <https://www.smartme.co.uk/technical.html>

⁵⁰ https://www.earpa.eu/earpa/39/etp_smartgrids.html

⁵¹ <https://www.law.cornell.edu/uscode/text/42/chapter-152/subchapter-IX>

⁵² <http://www.ift.org.mx/usuarios-de-internet/calidad-de-servicio>

realizar mediciones de calidad del servicio de Internet móvil. Estas se hacen de forma periódica, en campo, aleatorias, sin previo aviso y simultáneamente a todos los operadores dentro de su área de cobertura garantizada.

Cuando se habla de calidad del servicio, se puede entender de forma muy general, como el recibir un mínimo de calidad para que éste sea consumible y aceptable. También, mencionamos que existen políticas de QoS que se pueden implementar con el fin de priorizar contenidos ante un cierto marco de referencia de prioridades (la analogía de la calle y la ambulancia).

Ha habido un crecimiento muy importante en los servicios en el mundo, especialmente en América Latina, una región con 100% de penetración móvil, de acuerdo a la GSMA⁵³, lo que ha puesto mayor presión en los operadores móviles, que deben trabajar rápidamente en responder al incremento de servicios digitales.

La calidad del servicio es un factor que los operadores trabajan de forma integral, incluyendo evaluaciones y mejoras en diversas áreas, como los canales de atención al cliente, sistemas de cobro y servicios tecnológicos provistos sobre la red, como voz, datos y SMS. Vea la figura 3-18 donde se expone el caso de crecimiento en América Latina.⁵³

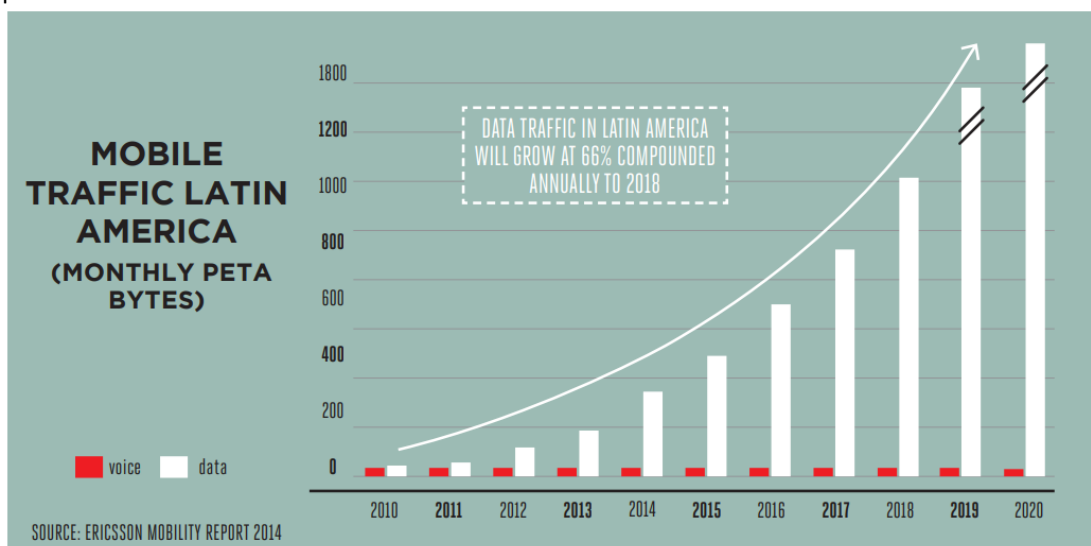


Figura 3-18. Tráfico móvil en América Latina, en *petabytes* mensuales.

⁵³ <https://www.gsma.com/latinamerica/wp-content/uploads/2015/12/mobile-quality-of-service-latam-2015.pdf>

De las figuras anteriores se puede observar que la industria de telecomunicaciones, ya sean móviles o fijas, está creciendo a un ritmo sin precedentes, por lo que los operadores y entidades regulatorias deben tener claro los factores pueden mermar la entrega del servicio, así como la experiencia del usuario, especialmente cuando puede haber situaciones de emergencia que dependen de un correcto funcionamiento. Uno de los costos más altos de un operador, es su instalación de infraestructura (siempre y cuando no se trate de un operador móvil virtual), donde radican las estaciones base que permitirán la cobertura y la entrega del servicio. Sin embargo, la calidad no depende únicamente del número de antenas instaladas ya que, a diferencia de redes fijas, hay varios factores que pueden impactar el servicio. Entre los más importantes existen:

- A) El número de usuarios, que varía de celda a celda
- B) Factores urbanos varios: movimiento de las personas, tráfico, accidentes, congestión, protestas, eventos, etc.
- C) El día y la hora.
- D) Los patrones de consumo.
- E) Clima, especialmente la lluvia.
- F) Obstáculos entre las terminales y la antena, que pueden causar diversos efectos degradantes como el desvanecimiento (*fading*), o los esquemas de vehículos de alta velocidad como trenes.
- G) La distancia entre la estación base y el usuario.
- H) Uso no regulado de amplificadores y otros dispositivos que impactan en la red.

Además, la GSMA establece que las políticas públicas no deberían ignorar cuestiones de inclusión, sino favorecer el acceso y también señalan que un marco regulatorio débil puede culminar en reducir el acceso de los servicios al sector de menor ingreso de la población. Esto se presenta mejor en las figuras 3-18 y 3-19.

La importancia de medir la calidad de forma objetiva radica en hacer las mediciones adecuadas y deberían ser realizadas por los entes reguladores. Las claves para medir efectiva y objetivamente son, de acuerdo a la GSMA:

1. Considerar una combinación de medidas estadísticas generadas por el operador, así como de terceros.

2. Usar métodos automatizados para pruebas de campo (*drive test*) con el mínimo de intervención manual.
3. Realizar pruebas extremo a extremo en una red (*end-to-end*).
4. Aplicar una muestra representativa de prueba de llamadas, para asegurar que los resultados sean representativos del estado de la red en un área de servicio particular (es decir, tener un buen intervalo de confianza).
5. Usar tiempo suficiente de prueba.

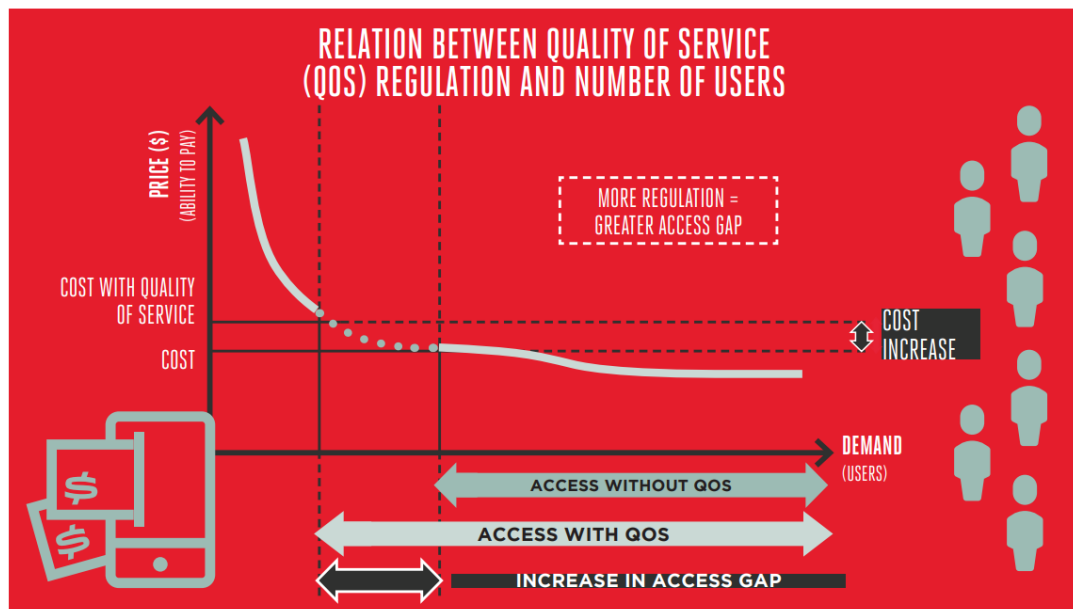


Figura 3-18. Relación entre la regulación respecto a la calidad del servicio (QoS) y el número de usuarios, de acuerdo a GSMA.

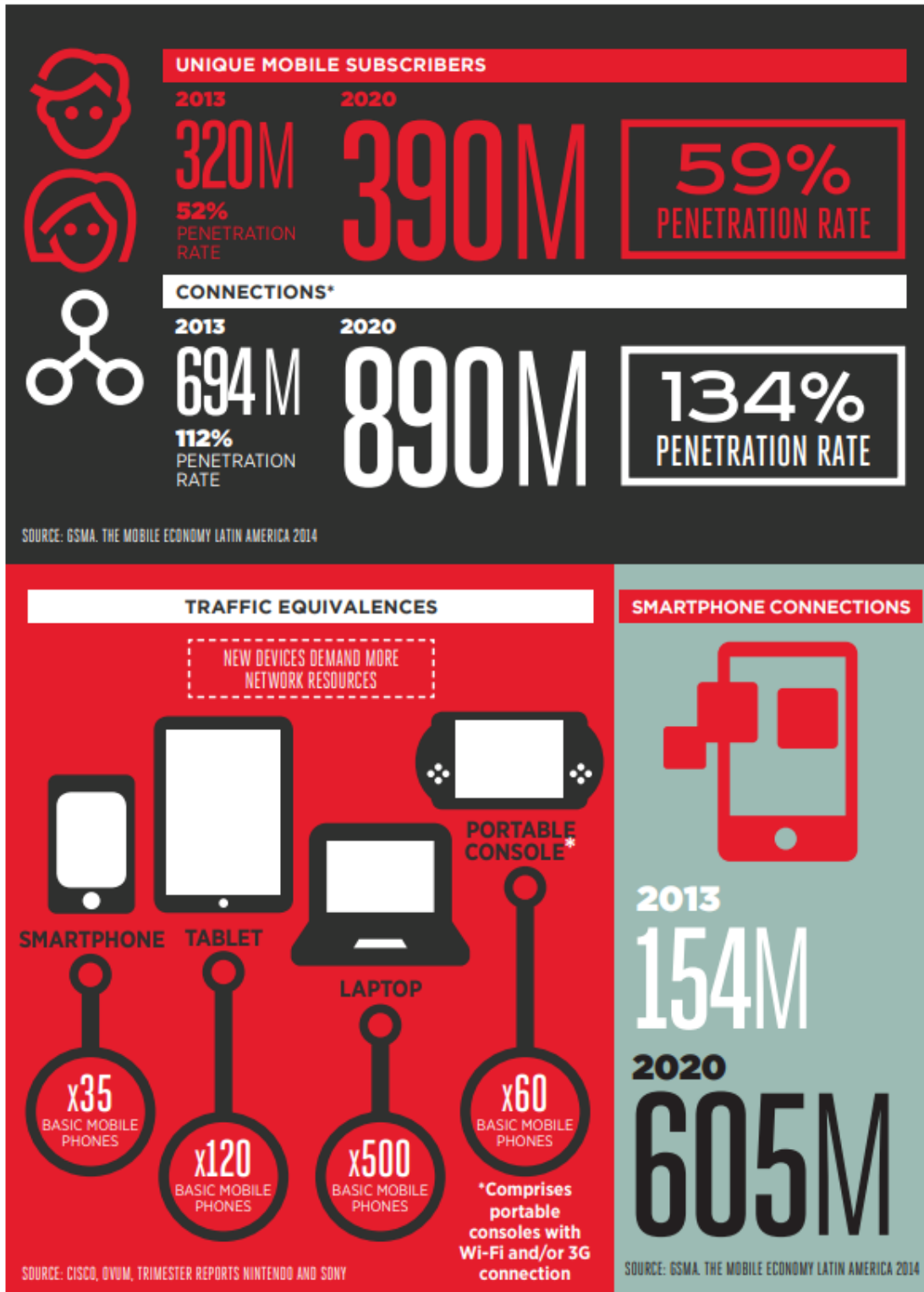


Figura 3-19. Infografía sobre el incremento de conexiones.

Existen algunas entidades que emplean pruebas desde las terminales (como una aplicación o sitio web). En estos casos, es importante tener en cuenta:

- El número de usuarios
- Metodología de medición de velocidad promedio
- Actualización de las muestras
- Calidad del reporte de información y su perfil de uso.

Las aplicaciones que son usadas como herramientas de medición pueden ser una referencia, pero no deberían ser bajo ninguna circunstancia la única forma de mediciones, pues resultan unidimensionales, por lo tanto, no deberían ser el sustento técnico para emitir sanciones.

La figura 3-20 emitida por GSMA⁵³ es una recomendación simplificada de cómo debería ser el flujo de trabajo con los operadores:

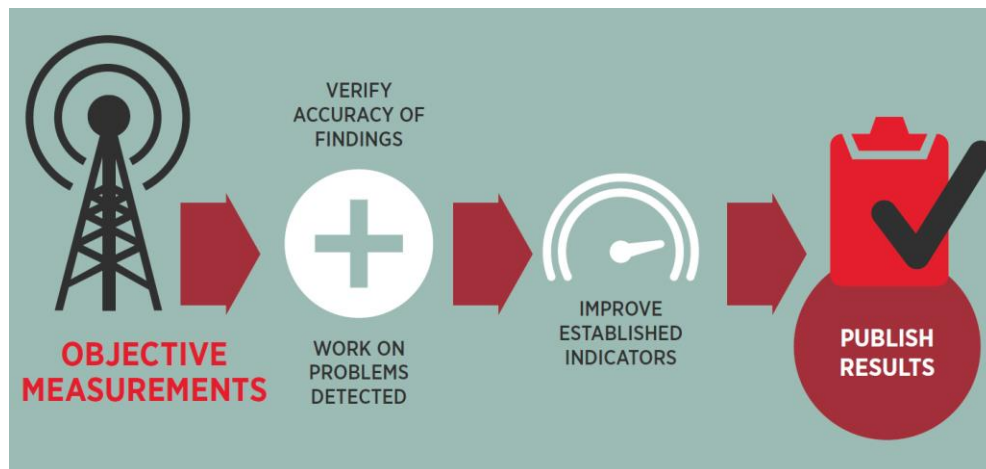


Figura 3-20. Flujo de trabajo de medición de la calidad de redes móviles.

Cuando hablamos de internet fijo, también cabe el concepto de medir calidad del servicio, pues es común escuchar personas decir “*mi internet es lento, se traba mucho, no carga bien*”. En el caso de internet fijo, los factores que afectan la velocidad efectiva y calidad del servicio de Internet son:

- El tipo de terminal en función de sus capacidades.
- Medio de transmisión: Cable/Cobre/Fibra.
- El tipo de contrato del usuario relativo a velocidades de acceso y el tipo de segmento (residencial o corporativo).

- La aplicación que está siendo demanda por el usuario.

Por otra parte, desde la demarcación de la red caben otros factores que impactan la calidad del servicio, como la capacidad de las interfaces, la capacidad de procesamiento de los elementos de red que la componen y el uso de elementos que limitan ciertos tipos de tráfico, entre otros.

Como se ha comentado, una forma de medir es usando una aplicación o sitio web, otra es usando sensores no intrusivos o mínimamente intrusivos (conocidos en el mercado como ‘sondas’), y otra es usar el mismo dispositivo como punto de referencia de medición. Cada uno tiene sus beneficios económicos, logísticos y técnicos, sin embargo, siendo coherentes con lo presentado en este documento, se considera que una solución no intrusiva siempre será mejor, y no es la excepción en los casos que hemos comentado hasta ahora respecto internet móvil y fijo.

3.3.1 Casos en el mundo

Actualmente existen plataformas populares para la medición de la calidad de telecomunicaciones fijas y móviles, en éstas últimas, con más presencia de datos por colaboración distribuida (*crowdsourcing*) que se originan de los dispositivos que solicitan la medición. De los más reconocidos son Open Signal y Ookla. Cada una con enfoques finales distintos y metodologías diferentes. Open Signal suele ser usado más para redes móviles ya que genera información de las radiobases y es más preciso al respecto entre más usuarios usen su plataforma. Ookla con su herramienta popular Speedtest, es más directa en el sentido que arroja las mediciones de carga, descarga y el ping, que está relacionado con la latencia que escribimos anteriormente.

Mencionamos a ambas, porque emiten reportes, algunos con más periodicidad que otros enfocados a una región o país en particular que vale la pena comentar. Empezando por Ookla⁵⁴, el más reciente es de 2016 y es relevante porque es post-Reforma de Telecomunicaciones (2014), un evento que tuvo un impacto positivo en las tarifas y en la competencia en el sector, que benefició al usuario final. En la figura 3-21 se muestra uno de los encabezados de sus reportes.

⁵⁴ <https://www.speedtest.net/reports/es/mexico/>

De acuerdo a este reporte de Ookla: “La industria mexicana de telecomunicaciones ha visto cambios significativos desde la introducción, en 2014, de nuevas reformas regulatorias. Estas reformas han pavimentado el camino para crear mayor competencia entre proveedores de servicios datos fijos y móviles, teniendo como resultado mejores opciones para los consumidores, mientras los operadores pelean por las más altas velocidades de conexión y mayor mercado cautivo. La industria mexicana de telecomunicaciones ha demostrado una creciente emoción como resultado. Hemos visto, hasta junio de 2016, un incremento en el promedio de las velocidades de descarga en servicios de banda ancha fija y móvil, con 48%, hasta 20 Mbps, y 76%, hasta 16.19 Mbps, respectivamente. Los servicios de carga también han tenido una notable mejoría, con un incremento del 73% para banda ancha fija, hasta 11.03 Mbps, y 108% en móvil, hasta 9.49 Mbps. Con esta tendencia hacia un mercado más diverso y competitivo, con certeza, los años por venir estarán marcados por más progreso y competencia enfocada en satisfacer al consumidor. El panorama de las telecomunicaciones en México ha tenido varios cambios en años recientes. La reforma de Telecomunicaciones del año 2014 significó la apertura de los monopolios que Telmex y Televisa ejercían en la industria al forzar a la competencia a usar su infraestructura. También, fue un paso importante para abrir la ventana de posibilidades en materia de telecomunicaciones. Como resultado, ha habido una serie de fusiones e inversiones cuya finalidad ha sido fortalecer a las compañías de la competencia, haciéndolas opciones viables.”



Figura 3-21. Presentación de la plataforma Speedtest de Ookla.

A continuación, se presenta en las figuras 3-22 y 3-23 las velocidades de banda ancha fija y móvil, según Ookla, en 2016:

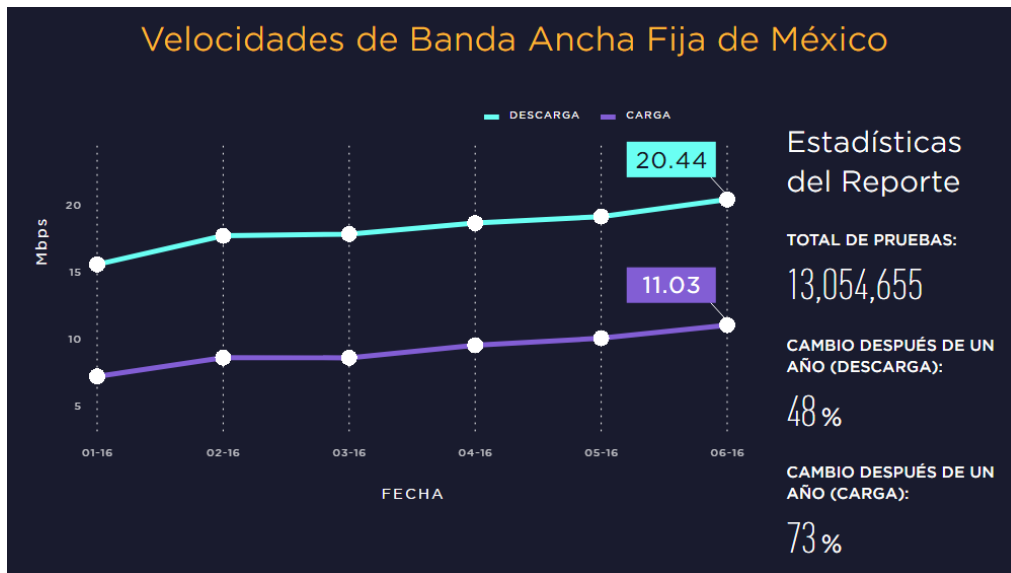


Figura 3-22

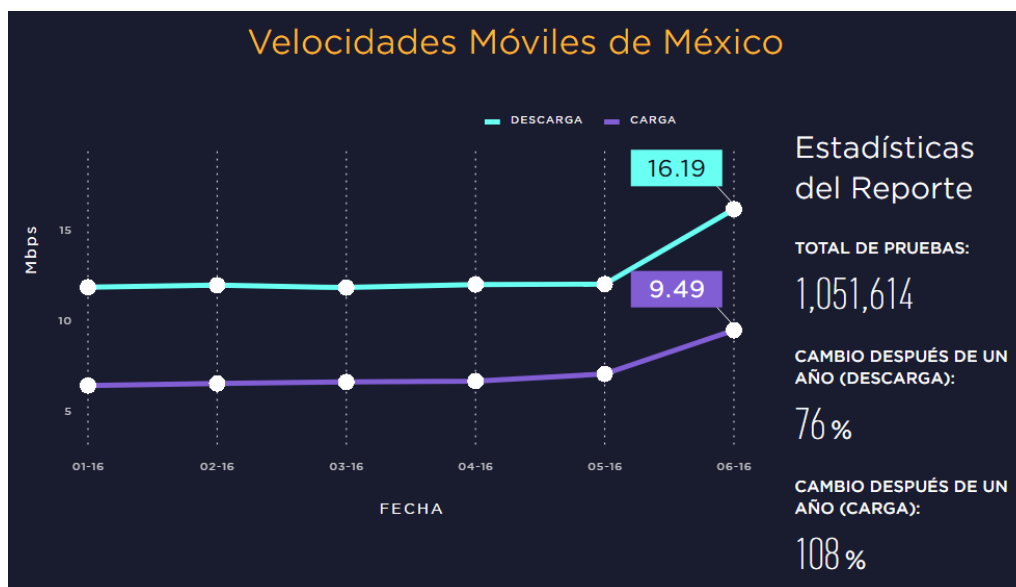


Figura 3-23

En cuanto a Open Signal, el reporte más actual al momento de la redacción de este documento es de abril 2019⁵⁵, donde comentan en sus hallazgos clave, que los operadores han alcanzado nuevos logros y avances técnicos en ciudades grandes, incrementando la penetración de lo comercialmente llamado 4G, mencionando que si bien Telcel sigue siendo dominante, AT&T le

⁵⁵ <https://www.opensignal.com/reports/2019/04/mexico/mobile-network-experience>

sigue los pasos de cerca. En las figuras 3-24 y 3-25 se muestran los encabezados y datos sobresalientes del reporte de Open Signal.



Figura 3-24. Resumen del reporte sobre México de Open Signal.

Mobile Experience Awards, Mexico			
OPENSIGNAL April 2019, Mexico Report	Telcel	Movistar	AT&T
4G Availability			WINNER
Video Experience	WINNER		
Download Speed Experience	WINNER		
Upload Speed Experience	WINNER		
Latency Experience	WINNER		

Figura 3-25. Reconocimiento general de Open Signal a los operadores móviles en México.

Como referencias complementarias al tema, algunos países han decidido implementar una o más formas de poder medir la calidad del servicio. Italia lo maneja vía una plataforma web⁵⁶, Brasil lo intentó muchos años usando sondas, y en su caso particular, no fue exitoso al final para ellos, ya que muchas sondas se perdían con el tiempo. Claro que, mucho depende de la región y algo que funcione en un lugar, dado su contexto, no necesariamente funcionará en otro.

⁵⁶ <https://www.agcom.it/misura-la-qualita-del-servizio>

Estados Unidos tiene el MLAB⁵⁷, que es un esfuerzo en conjunto entre múltiples entidades del país como Google, Princeton University, entre otros, con la finalidad de ofrecer rutinas de prueba y *datasets* para ser analizada por quien lo requiera.

La conversación sobre el ir adaptando las políticas públicas orientadas a la medición de la calidad de los servicios de TICs va en auge y es un tema que con la colaboración de todas las partes involucradas, se irá afinando con el paso del tiempo.

3.3.2 Datos masivos (*Big Data*)

Se han tratado los temas de recolección de datos, a través de *Smart meters*, así como también de aplicaciones o plataformas web, incluso de sensores y sondas, para los fines de distribución de energía eléctrica, banda ancha fija y móvil, así como para otros servicios como gas, agua, etc. Incluso que algunas de estas soluciones se valen de juntar datos de una base de usuarios, *crowdsourcing*, pudiendo juntar miles de datos en un intervalo breve de tiempo. Esto genera cantidades enormes de información que puede resultar abrumador gestionar para cada fin.

Cuando aceptamos estas tendencias como en crecimiento, podemos ver que se está generando una cantidad enorme de información, lo cual con IoT incrementará en todos los ámbitos, especialmente cuando las redes 5G estén implementadas, algo que aún no sucede al tiempo de redacción de este documento. Es necesario definir entonces, que es Big Data, que se suele definir con el concepto de las 3V⁵⁸:

- Volumen: la cantidad de datos generados, almacenados y analizados. La cantidad de datos almacenados determina el nivel de comprensión que se puede obtener de los datos.
- Variedad: tipo y naturaleza de los datos. Históricamente, los datos se originaban de una sola fuente, lo que se acomodaba de forma natural en columnas y filas. Hoy, los datos tienen diversos orígenes, en diversos formatos.

⁵⁷ <https://www.measurementlab.net/tests/>

⁵⁸ <https://www.gsma.com/iot/wp-content/uploads/2018/11/CLP.25-v2.0.pdf>

- Velocidad: la velocidad a la que los datos se generan y procesan. En el pasado, se decía que los datos procesaban por lote (*batch*), y en la actualidad, se habla de millones de transacciones por minuto.

Es relevante mencionar el concepto de *big data* en este documento porque tiene que ver con *data sets*, muchos de ellos largos y complejos en su manipulación, donde métodos tradicionales no dan el ancho. Por los retos de recolección, búsqueda, almacenamiento y análisis de los datos. Por usar algoritmos y técnicas analíticas predictivas para extraer valor agregado a los datos, y porque puede aportar en la toma de decisiones, como se ha comentado, con visión a una mayor eficiencia de operación, reducción de costos y reducción de riesgos. Todo esto es coherente con lo que se ha presentado hasta el momento.

Recordemos que se vive en un mundo cada vez más interconectado donde la digitalización del mundo físico es real en contraste al pasado, la combinación software y hardware trabajando en sinergia para hacer más difusa esa brecha. Ahora, todos disponemos de algún dispositivo, que tiene un rol significativo con nosotros o con otros objetos que a su vez se conectan entre sí y con Internet generando una gran cantidad de datos.

Big Data no puede ser ajeno a IoT ya que una de los efectos del arribo de IoT es la generación de muchos datos que son analizados a través de las tecnologías *Big Data* con el fin de ofrecer mejores servicios ante el usuario.

Capítulo 4

Conclusiones

En las presentes conclusiones se comentará el concepto de ciudades inteligentes, pues el autor considera que todo lo descrito hasta el momento, pasando por los temas de desregulación, como NILM, Smart Grids y IoT, inevitablemente desembocan en una visión y meta más grande, compleja y ambiciosa, como lo son las llamadas *Smart cities*, pues es la convergencia última de todos estos recursos y técnicas, coexistiendo y trabajando en sinergia. A continuación, se presentan argumentos y datos que justifican la opinión del autor.

Del 2012, que fue cuando se inició esta investigación a 2019, ha surgido una gran cantidad de esfuerzos para llevar información al público acerca de la relevancia de SG y su relación con otras tecnologías, como IoT, así como su inherente impacto positivo en el ambiente, muchas veces en forma accesible para todo tipo de personas, como los materiales que se encuentran en la Figura 4-1 proveniente de *WhatIsSmartGrid.Org*:

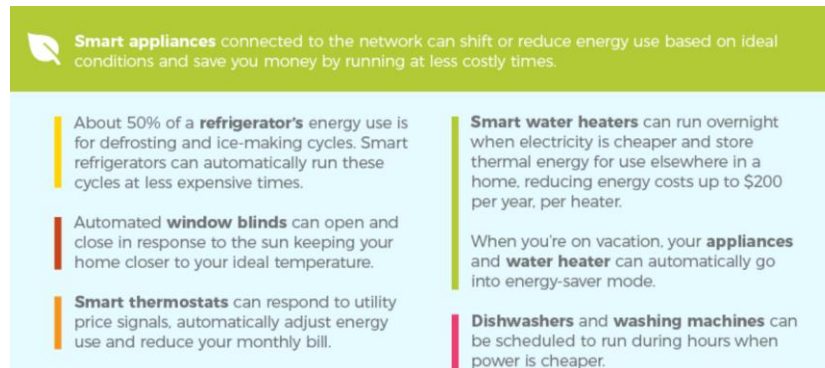


Figura 4-1.

Sin duda, IoT va a poder ser útil para los fines de SG para permitir un mejor flujo de información, y más útil, y una mayor conectividad a través de la infraestructura, con beneficios hasta en los hogares de las personas. A través de IoT, los consumidores, los fabricantes y los proveedores de servicios van a encontrar nuevas formas de gestionar dispositivos y poder mejorar en los aspectos de la conservación de recursos, reduciendo costos y generando

ahorros usando *Smart meters*, *Smart plugs*, dispositivos inteligentes conectados, entre otros. Cuando coexisten todos esos esfuerzos, se puede apuntar a visiones y metas que hace muchos años sólo se encontraban en la ciencia ficción, como las ciudades inteligentes.

Se ha mencionado el término de *Smart cities* o ciudades inteligentes, y es relevante explicarlo un poco más, como concepto de conclusión y hacia donde apuntan estos esfuerzos.

Una **ciudad inteligente** es un marco predominantemente compuesto por las TICs para trabajar en el desarrollo, la implementación y la promoción de prácticas de desarrollo sostenible para afrontar los crecientes retos de la urbanización. Una gran parte de este esquema de TICs es fundamentalmente una red inteligente de dispositivos y objetos conectados que transmiten datos utilizando tecnologías de telecomunicaciones y computación, en términos de ciencias de datos, como la nube. Las aplicaciones del IoT basadas en la nube recogen, analizan y manejan datos en tiempo real para ayudar a los poblados y ciudades, las empresas y los ciudadanos a decidir mejor, mejorando la calidad de vida.

Las comunidades tendrán cada vez una mayor interacción con los ecosistemas de las ciudades inteligentes en una diversidad de modos manejando muchos tipos de dispositivos móviles, así como vehículos y hogares conectados. El empate de dispositivos y datos con la infraestructura física y los servicios de una ciudad puede disminuir los costos y tener un impacto benéfico en la sostenibilidad. Con la ayuda del IoT, las ciudades pueden mejorar la distribución de energía, mejorar la recolección de basura, disminuir el tráfico y hasta lograr una mejor calidad del aire.

La necesidad de lograr ciudades inteligentes radica en que la urbanización es un fenómeno que no se puede parar. Actualmente, el 54% de la población está concentrada en ciudades, una proporción que se estima pueda alcanzar un 66% para 2050⁵⁹. De acuerdo a Gemalto, una de las empresas líderes en la fabricación de SIMs, credenciales digitales y tarjetas inteligentes (*Smart cards*), se debe tomar en cuenta que, en combinación con el crecimiento general de la población, la urbanización puede añadir otros 2,500 millones de

⁵⁹ <https://www.gemalto.com/latam/iot/inspiracion/ciudades-inteligentes>

personas a las ciudades en las próximas tres décadas. La sostenibilidad ambiental, social y económica es una necesidad esencial para seguir el ritmo de esta vertiginosa expansión que representa un reto para las comunidades.

Ventajosamente, cerca de 190 países han acordado objetivos para el crecimiento sostenible: la tecnología de ciudad inteligente es fundamental para la conquista y el cumplimiento de esas metas.

Para construir una ciudad inteligente efectiva, la ciudad debe comenzar por supervisar las iniciativas de ciudades inteligentes y coordinarlas a través de los diferentes departamentos, y sobretodo, definir una visión estratégica a largo plazo para la ciudad. Otro paso importante es definir el marco y el gobierno indicado para asegurar la flexibilidad y rendición de cuentas de los proyectos. La mayoría de los proyectos de las ciudades inteligentes necesitan intercambio de información y colaboración entre equipos que en general no suelen trabajar juntos, dado que estarían por adoptar tecnologías similares, como divisiones a cargo de luces del tránsito y manejo de residuos. La colaboración es entonces indispensable, sea entre departamentos de la ciudad, empresas locales o ciudadanos. En la figura 4-2 se muestra una infografía sobre beneficios de IoT.

Esto es realmente cierto al usar sensores y medidores de IoT y Big Data para crear un panel con los servicios ofrecidos por la ciudad; que permita identificar problemas críticos de infraestructura y potenciales cuellos de botella. El líder del proyecto, llamado generalmente Director de Sistemas de Información, tendrá la autoridad suficiente para dirigir y supervisar los proyectos de la ciudad Inteligente a lo largo de la estructura municipal y así evitar la fragmentación o el doble esfuerzo.

Es válido tener dudas acerca de la viabilidad y seguridad de estas ideas, ya puestas en producción, pero tratar a fondo el tema, podría ser Las ciudades inteligentes solo pueden funcionar si podemos confiar en ellas. Todos los participantes del ecosistema (gobiernos, empresas, diseñadores de software, fabricantes de dispositivos, proveedores de energía y proveedores de servicios de red) deben cumplir su rol e integrar soluciones que cumplan cuatro objetivos de seguridad básicos:

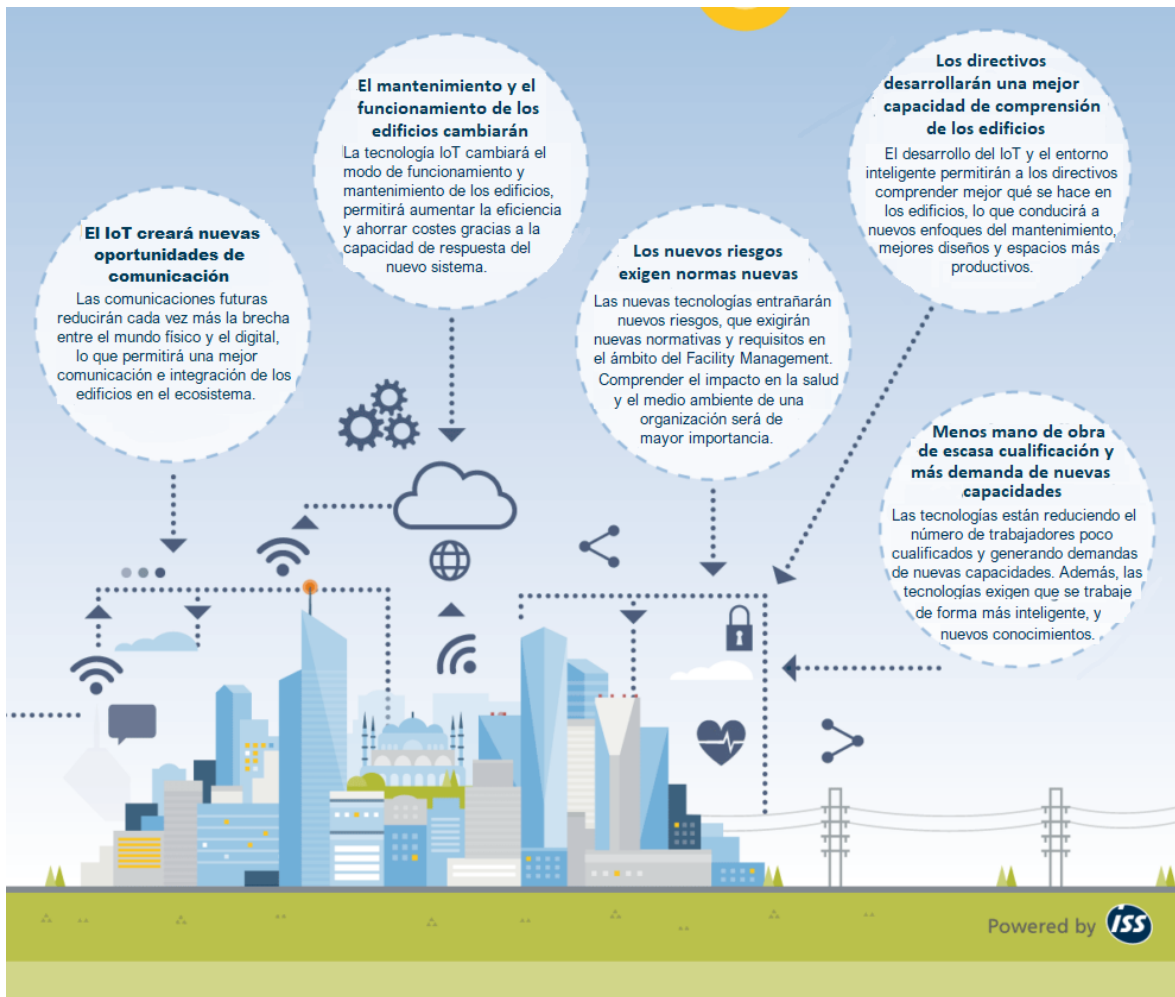


Figura 4-2⁶⁰

1. Disponibilidad: sin una capacidad de acceso a los datos accionable, en tiempo real y confiable, la ciudad inteligente como concepto no tiene futuro. Cómo se recolectan, gestionan y comparten los datos es esencial y las soluciones de seguridad deben evitar los efectos negativos sobre la disponibilidad.
2. Integridad: las ciudades inteligentes requieren de datos confiables y precisos.
3. Confidencialidad: algunos de los datos recopilados, almacenados y analizados contendrán información sensible sobre los consumidores. Se deben tomar medidas para evitar la divulgación no autorizada de la información confidencial.

⁶⁰ <https://www.servicefutures.com/es/iot-smart-cities-facility-management>

4. Responsabilidad: los usuarios de un sistema deben ser responsables de sus acciones. Toda interacción con sistemas sensibles debe documentarse y asociarse con un usuario específico.

Las regulaciones y normas seguirán evolucionando para lograr una mejor y mayor adopción de dispositivos a través del SG. Sin duda, la migración a *Smart meters* está añadiendo una nueva capa de complejidad, pero también traerá muchos beneficios como el retorno de la inversión, una mejor experiencia del usuario, mayor eficiencia energética, entre otros.

Todos estos temas presentados tienen matices multidisciplinarios y presentan retos y oportunidades para la investigación y desarrollo de electrónica aplicada y ciencias eléctricas. Existirán grandes avances en muchas áreas especializadas como manufactura, control, robótica, automatización de procesos, procesamiento de señales, sistemas de visión, electrónica de potencia, entre otros.

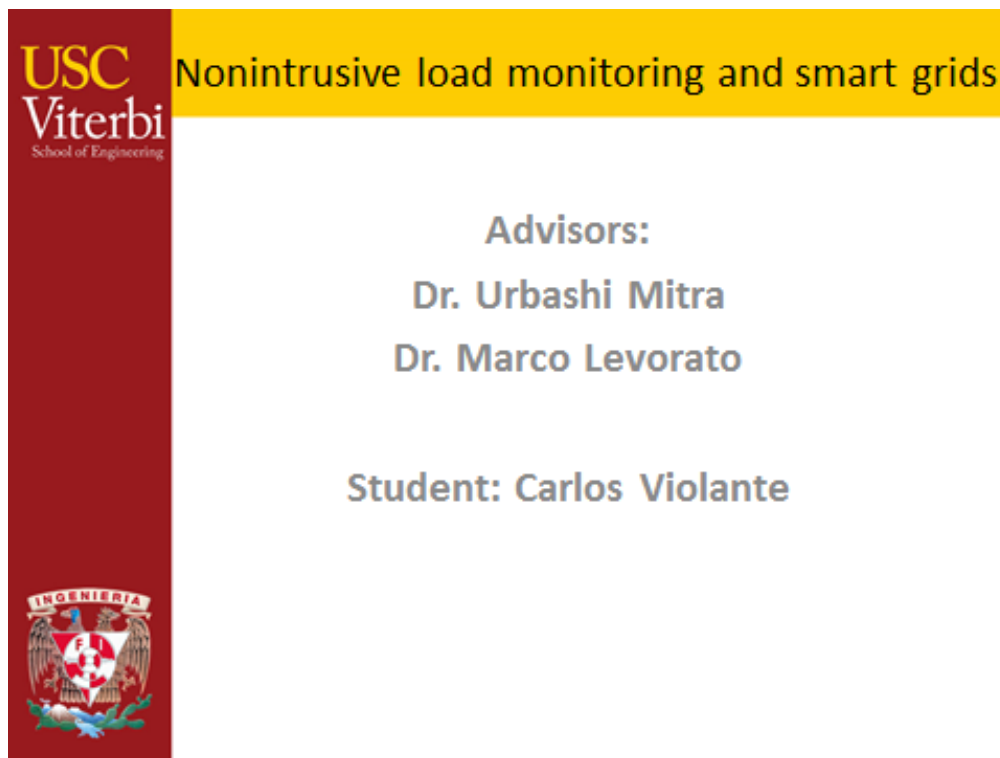
Las ciudades deben seguir teniendo en sus agendas, el enfoque a temas de conservación de los recursos energéticos, con lo que, sin duda, IoT extenderá los beneficios de SG más allá de la distribución, automatización y monitorización por parte de los proveedores de servicios. Los sistemas de gestión dentro de los hogares y edificios nos ayudarán a darnos cuenta de oportunidades de mejora en consumo y comportamientos. Eventualmente, estos sistemas alcanzarán un importante nivel de autonomía tomando muchas decisiones todos los días, trabajando con muchos sensores y *Smart meters*. Pero todo esto empieza logrando una red de suministro más inteligente y mejor conectada.

Como comentario final, la Universidad Nacional Autónoma de México, vía la Facultad de Ingeniería, ya ha tomado atención a este tipo de temas, pues ha incorporado diplomados que profundizan en los temas aquí presentados.

Apéndice

Presentación USC

En las siguientes diapositivas se encuentra la presentación ofrecida en USC, estando presentes académicos de USC y UNAM. La presentación explica las generalidades de NILM y Smart Grids, explicando los principios en lo que se basan, así como las directivas básicas de operación. El manejo de datos, como ya se explicó, tiene que ver con mediciones que se tomaron en viviendas de Estados Unidos para poder realizar detección, análisis y en general, lograr desagregar el consumo eléctrico. Se presentan resultados usando MATLAB para procesar cerca de 5 GB de datos, de donde se sacan gráficas que permiten interpretar resultados y sacar conclusiones:



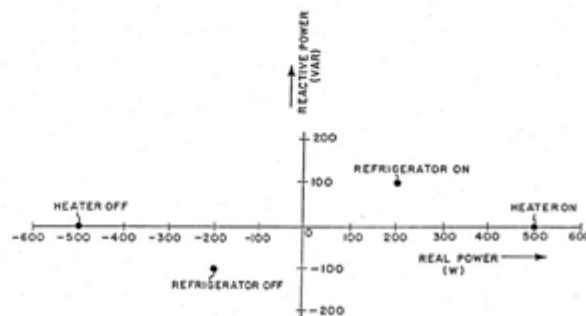
The project

- It is related with NILM and Smart Grid technologies.
- With how the electrical energy consumption can be disaggregated.
- The possible applications to energy audits, smart houses, smart buildings, money saving and ecology.
- It combines **power systems theory** and **communications theory**.



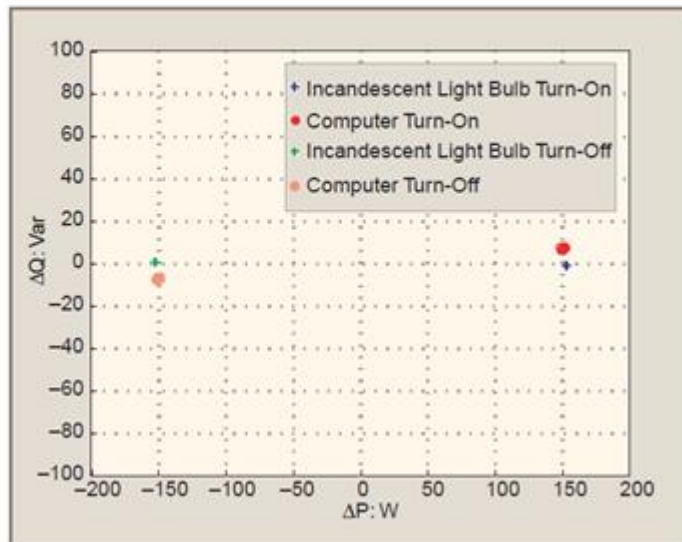
What is NILM?

- Is the name given to a set of techniques used to obtain estimates of the electrical consumption of individual appliances from measurements of voltage and/or current taken at a limited number of locations of the power distribution system in a building.





For example...

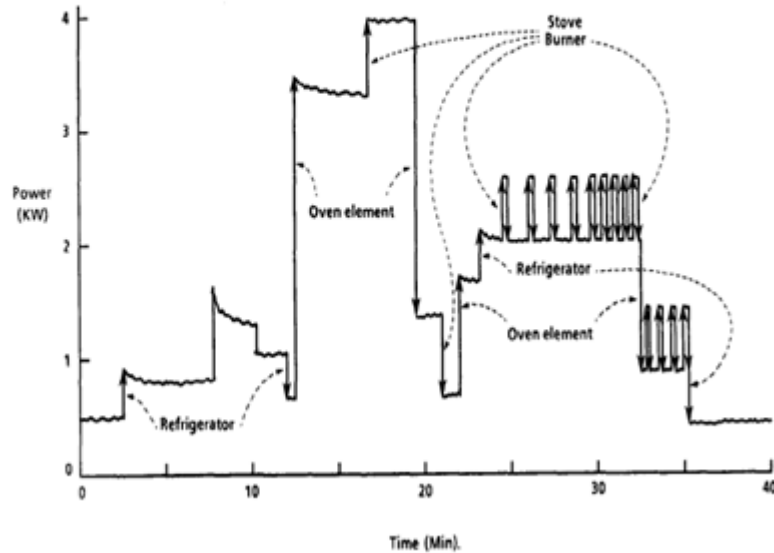


How does it work?

The system can measure both reactive power and real power. Hence two appliances with the same total power draw can be distinguished by differences in their complex impedance. It follows the next principles:

- Data acquisition
- Event detection
- Feature extraction
 - Classification
- Energy computation

Appliances show interesting signature events



The total power model

- A switching process is needed

$$a_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{if appliance } i \text{ is on at } t \\ 0, & \text{if appliance } i \text{ is off at time } t \end{cases}$$

for $i=1\dots n$

$$P(t) = \sum_{i=1}^n a_i(t)P_i + e(t)$$



where $P(t)$ is the p-vector as seen at the utility at time t , and $e(t)$ is a small noise or error term.

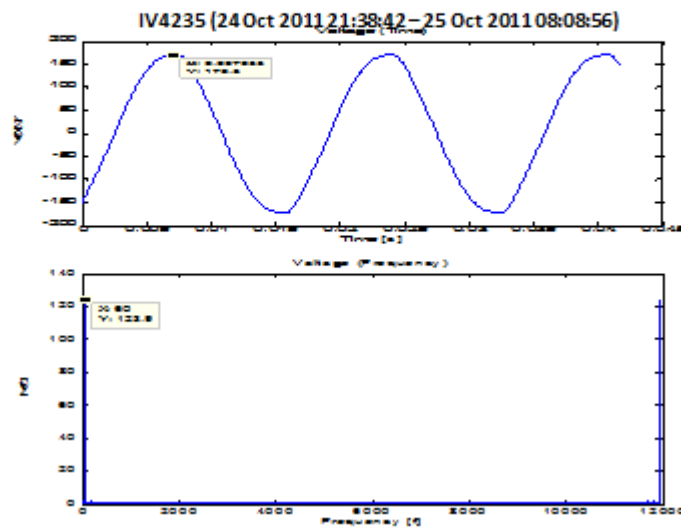
Working with BLUED

- The main material for this project was the Building-Level fully-labeled dataset for Electricity Disaggregation (BLUED).
- Contains high-frequency (12 kHz) household-level data from a single US household over a period of approximately 8 days.
- Also contains an event list of each time an appliance within the household changes state (e.g. microwave turns on).
- Real and reactive power.
- Voltage signals would be phased-shifted copies of each other so only one voltage signals was sampled.
- **Definition of 'event'**: any change in power consumption greater than 30 W and lasting at least 5 s.



Dataset analysis. The voltage approach.

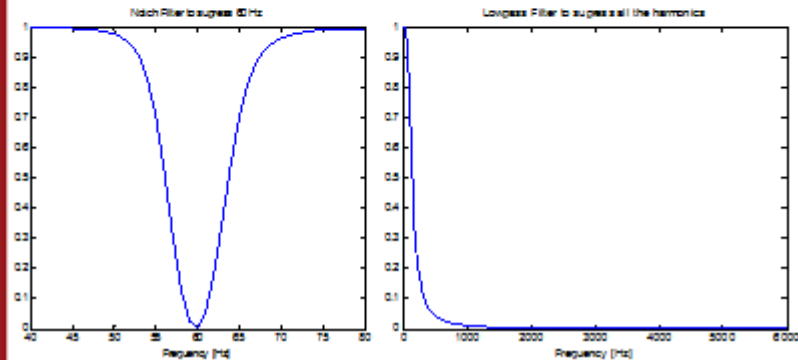
- More than a dozen of the available files were analyzed. Here I only show results from one of them, due little time.





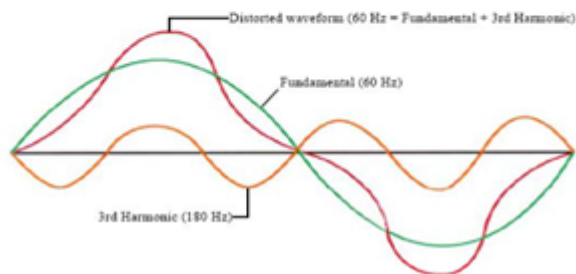
Filtering

- Two filters were developed in order to analyze and see how the signal should look like without the harmonics.
- The other approach was for the waveform without its fundamental 60 Hz component.
- This was applied to both the voltage and current vectors.
- Fast Fourier Transform (FFT) analysis was used; the proper scaling was also worked out.



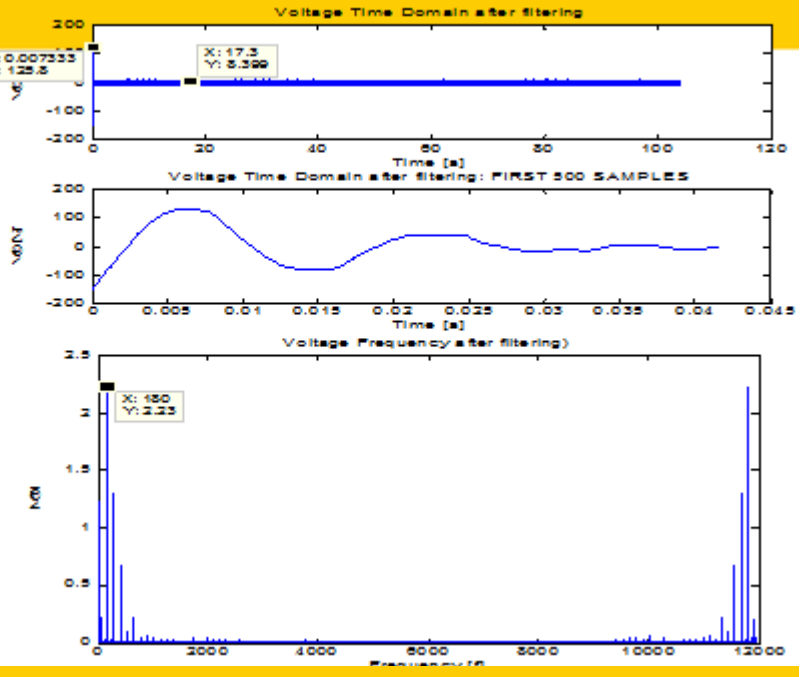
Harmonics on power systems. Why we should care?

- The infamous 3rd harmonic problem is present.
- As we should remember, harmonics are multiples of the fundamental frequency of a wave. They cause waveform distortions.
- If not properly designed or rated, electrical equipment will often malfunction when harmonics are present in an electrical system.

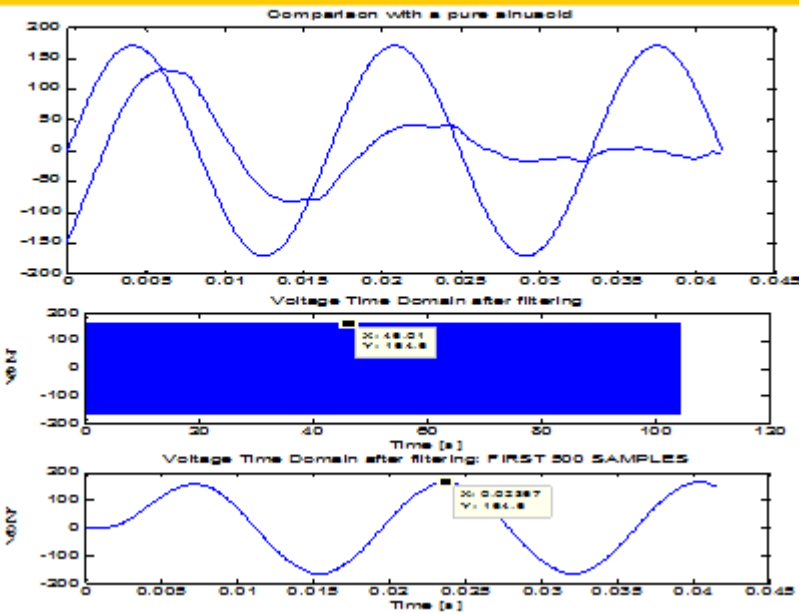




Find out the waveform of the harmonics

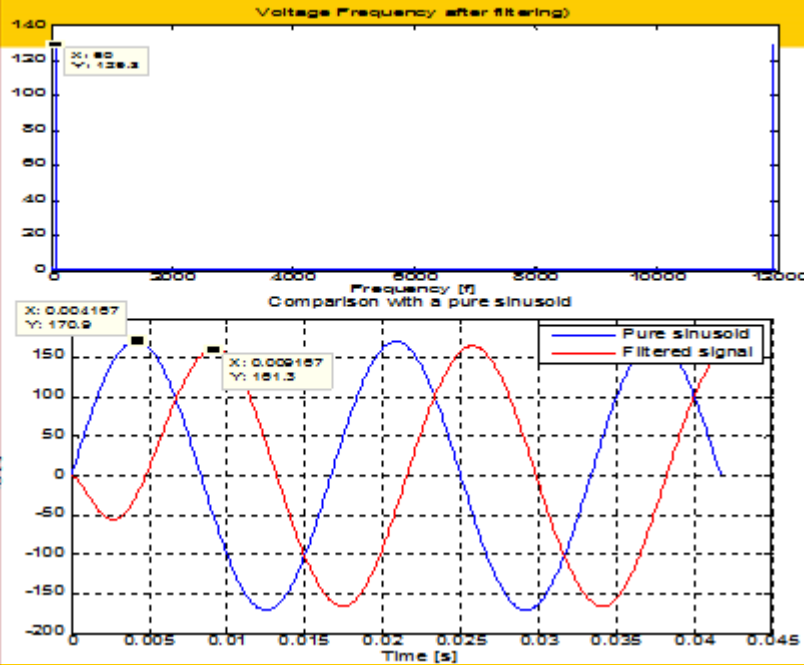


When compared to a pure sinusoid





Voltage signal after filtering all the harmonics



Dephase and amplitude

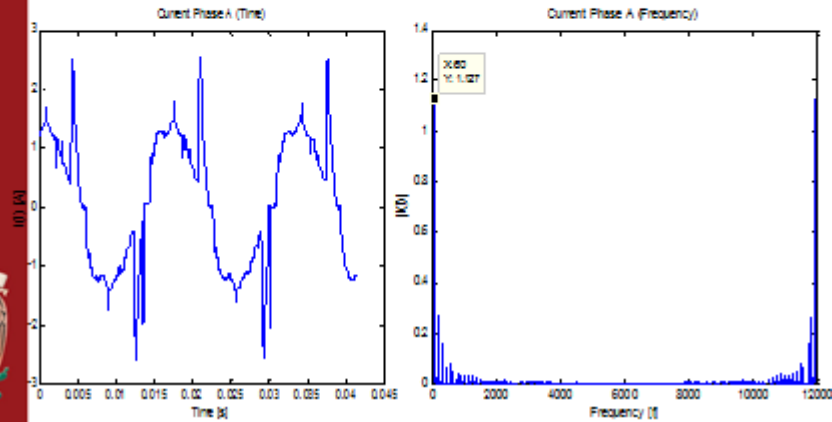
- The next lines should give us the dephase between the reference and the signal of our interest. Also we could get amplitude information.

```
[Y,I]=max(y(1:200));
[Y2,I2]=max(sen);
Del=abs(t(I)-t(I2));
Def=Del*360/inv(60)
[Y,I]=max(y(1:200));
Y3=max(y)
Deph = 108°, Y3 = 169V
```

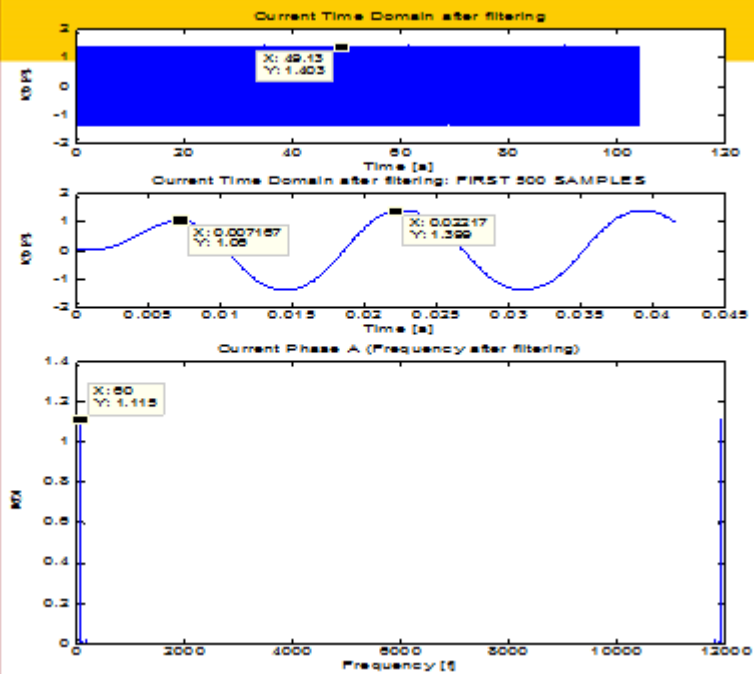
Following a similar path, we can find out the frequency varied in a non significant way

What about the current data?

- The voltage supply is pretty steady and for this we can assume there is much more information in the current signal than in the voltage signal. The voltage is kept pretty consistent by the electricity supplier, but the current varies with the appliances being used.



Current – Time domain after filtering



It is worth analyzing the harmonics because...

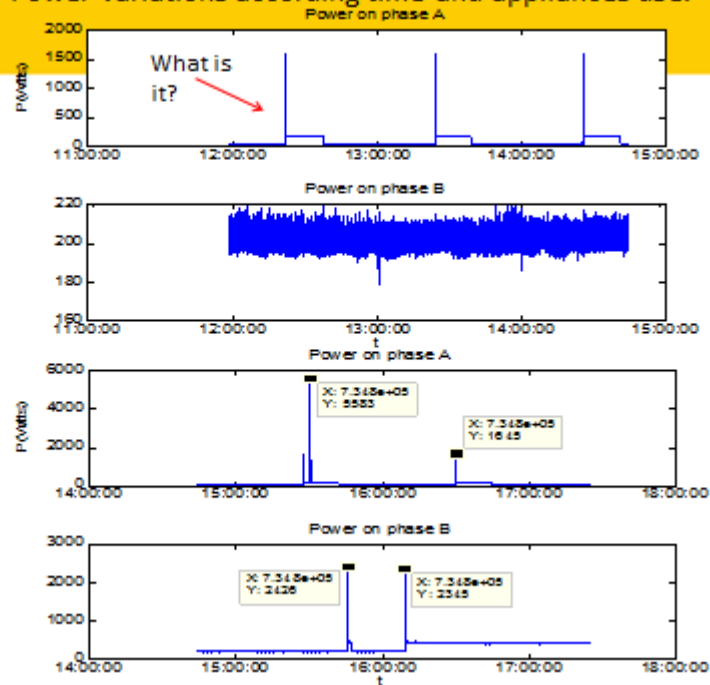
- Theoretically, higher harmonic information can be used both to track the energy consumption of the variable load and also to disaggregate this variable load from the power consumption of the remaining loads.
- Harmonic signatures can provide direct diagnostic information even without parameter estimation.

WHAT ABOUT POWER?

- Power show us how energy consumption changes, with the changes of current and voltage.
- It is easier to identify the 'steps' on a plot, and from there, flag them.
- We can track the time when the events happen.

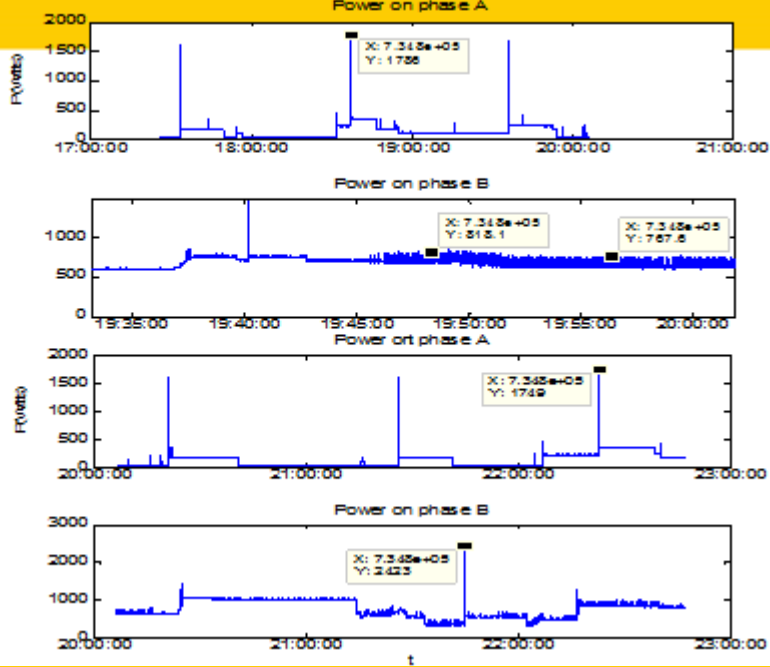


Power variations according time and appliances use.





As time goes on...



Relating the data with the labels

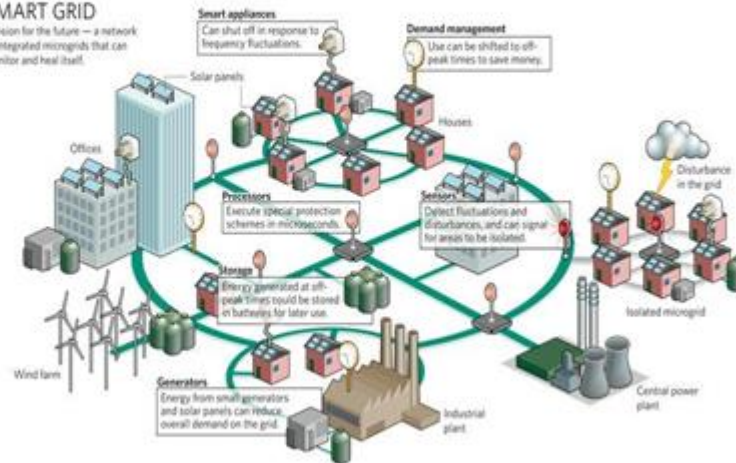
- For example (Date, Label, Phase)
10/20/2011 12:22:01.473,111,A
10/20/2011 12:37:40.507,111,A
10/20/2011 13:23:55.390,111,A

Here we have three labels, for the refrigerator, around 15-20 min, this is, the cooling cycle of regrigeration.

Smart grids

SMART GRID

A vision for the future — a network of integrated microgrids that can monitor and heal itself.



Smart grids

- It refers to electricity networks that can intelligently integrate the behavior and actions of all users connected to it, e.g., generators, customers, and those that do both—to efficiently deliver sustainable, economical, and secure electricity supplies.
- Sensing, transmission, and processing information relating to grid conditions, are vital for timely monitoring and controlling the network to ensure efficient energy supply, security, and safety of the network and demand management.



Smart grids

- SG is a multidisciplinary field presents many challenges and opportunities for industrial electronics research and development, which are concerned with the application of electronics and electrical sciences.
- Aspects of SG that need to be improved: ditributed control, demand prediction, generation prediction and demand response.



Conclusions and future work

- These are only the first steps into developing energy feedback system that displays not only total power consumption and cost, but also suggests specific cost-effective measures to improve energy efficiency.
- It also would help to transform how electricity, water, and natural gas are understood, studied, and ultimately consumed.
- A 10 to 15 percent reduction in electricity in the United States could be achieved, representing nearly 200 billion kWh of electricity per year. This reduction would be equivalent to the yearly power output of 16 nuclear power plants or 81.3 million tons of coal.
- The need of self-learning algorithms is fundamental; lack of them would greatly increase installation complexity of this kind of devices.
- Education to avoid people to make them understand the impact of more energy-consuming appliances and more effective conservation activities.



- For your attention, thank you!

Special thanks to:

Dr. Urbashi Mitra
Dr. Marco Levorato
Dr. Francisco Valero-Cuevas
Dr. Jesús M. Dorador
Dr. Mario Bergés
Kyle Anderson, Ph.D.
Tracy Charles
Carlos A. Marin
Roberto Zepeda



Declaración de responsabilidad.

La información presentada en este trabajo se obtuvo de diversas fuentes que se consideran fidedignas y se consignan puntualmente en las referencias. El uso dado a la información es de naturaleza estrictamente de investigación académica y de divulgación, sin fines de lucro o de otra índole. Se ha hecho también el mayor esfuerzo por acreditar debidamente datos, opiniones y contenidos presentados, por lo que cualquier error u omisión en ello, es del todo involuntario.

México, CDMX, noviembre de 2010