

Sistema de medición de energía multiusuario de alta precisión

Agustín S. Isasmendi[1], Oscar E. Goñi[2], Leandro J. Aguiere[3]

[1]Fac. Ingeniería., UNICEN, isasmendi.agus@gmail.com

[2]Instituto INTIA, Fac. Cs. Exactas, UNICEN, oegoni@exa.unicen.edu.ar

[3]Redimec SRL, laguierre@redimec.com.ar

Resumen En la actualidad, existen aún países con alto índice de marginalidad donde es difícil el acceso a los servicios que hoy parecen básicos. En este trabajo se describe la experiencia en el diseño y construcción de un medidor de energía multiusuario de alta precisión aplicable en situaciones donde la cantidad de suministro es limitada y por lo tanto debe ser racionalizada. El proyecto presenta características relacionadas con la reconfiguración, la flexibilidad y la precisión en la medición de manera tal de poder proveer un servicio de calidad a los usuarios de energía eléctrica. Si bien el sistema se diseñó considerando los requerimientos específicos del país Africano Kenia, sus características modulares y reconfigurables lo hacen también aplicables en el contexto de ciudades inteligentes.

1. Introducción

Desde hace ya varias décadas que los recursos del planeta se han visto seriamente comprometidos y hace tan sólo un par de años que han comenzado a tomarse acciones paliativas. Es por eso que la comunidad científica ha tomado a las energías renovables como tema impostergable en el presente y el futuro para su investigación. Pero no sólo generar energías limpias es parte del cambio. La concientización de usuarios ha tomado fuerte relevancia dentro de las ciencias sociales. Este trabajo se aborda desde una perspectiva técnica pero intenta dar soporte a la idea de analizar el impacto social de proveer energía eléctrica a poblaciones que no poseen este servicio proveniente de fuentes renovables ni no renovables.

Kenia, un país africano sub desarrollado, posee gran cantidad de habitantes que no acceden a estos servicios ya sea por razones de distancia o carencia de infraestructura. La solución que se está abordando en estas regiones es a través de mini redes aisladas [1]. Dependiendo de la cantidad y tipo de usuarios, el sistema de generación de cada mini red combina: energía solar, grupos electrógenos y almacenamiento de energía con baterías [2]. Sin embargo, la cantidad de energía generada es limitada y por lo tanto su administración requiere de control delicado y preciso.

El presente trabajo describe la experiencia del diseño y construcción de un sistema de medición de energía prepago, multiusuario y de alta precisión que se

2 Isasmendi, A. Goñi, O., Aguirre, L.

adapta a los requerimientos de servicios de energías renovables en comunidades que aún no cuentan con este servicio. El trabajo surge como un acuerdo comercial entre una empresa local (Redimec SRL) y una estadounidense (Renewvia Energy Corp) que provee servicios de parques solares en Africa. Si bien el trabajo se encuentra en funcionamiento en Kenia, sus características modulares permiten su aplicación en Argentina incentivado por una política de ahorro energético.

El trabajo se organiza de la siguiente manera: En la sección 2 se presentan los trabajos y productos relacionados. En la sección 3 se enumeran los requerimientos tanto generales como específicos que debe cumplir un sistema de medición de energía multiusuario mientras que en la sección 4 se describe de manera global el diseño. La sección 5 presenta las decisiones tecnológicas en cuanto al desarrollo de un caso concreto. Finalmente, la sección 6 muestra resultados sobre la performance y características del equipo y el software mientras que en la sección 7 se comentan conclusiones y comentarios adicionales.

El trabajo se presenta en un contexto de colaboración entre la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires y la empresa Redimec SRL.

Vale aclarar que en el presente informe se han omitido ciertos detalles de diseño e implementación por cuestiones de confidencialidad.

2. Trabajo y productos relacionados

Tradicionalmente, la medición de consumo eléctrico se realizó utilizando métodos mecánicos. Un conjunto de bobinas inductoras generan un movimiento que permite hacer girar un disco de aluminio de forma proporcional a la corriente que circula. Conocidas las relaciones de giro vs. corriente, es posible realizar la estimación proporcional del consumo. Si bien el principio de funcionamiento es simple, a lo largo de los años, la fricción genera desgaste y esto se traduce en pérdida de precisión lo que obliga a realizar una calibración periódica de los instrumentos.

La medición de corriente eléctrica no ha sido ajena a la revolución digital de los últimos años. El trabajo presentado en [3] es uno de los precursores en la medición digital de consumo eléctrico. Allí se presenta un medidor multiusuario que permite realizar mediciones para un edificio de departamentos. En ese entonces, un operario realizaba el registro de consumos en papel, pero todos en un mismo sitio. Años más tarde, con el auge de los DSP (Digital Signal Processors) los fabricantes electrónicos comenzaron a desarrollar chips para esta aplicación específica. Mediante la integración en el tiempo de parámetros como tensión y corriente con conversores analógicos digitales, es posible conocer de manera indirecta la potencia.

El trabajo presentado por [4] presenta una aplicación donde se utilizan múltiples circuitos integrados STC11F52XE en un medidor multiusuario de energía prepaga. La información producida por estos sistemas puede ser utilizada más allá de los fines de facturación. Con determinados parámetros, es posible realizar cálculos precisos de consumos por regiones dentro de ciudades o bien consumos por franjas horarias.

Ya con la aparición de sistemas orientados a IoT (Internet Of Things), este tipo de aplicaciones resultan cada vez más importantes en el contexto de ciudades inteligentes. En este caso en particular, el proveedor de suministro eléctrico tiene la capacidad de conocer la demanda sectorizada de la red en tiempo real. Con esta información es posible realizar ajustes precisos en corrientes provistas por redes de media y alta tensión de manera dinámica. Por otro lado, si se consideran políticas de ahorro de energía, es posible tasar el servicio con diferentes tarifas considerando la franja horaria o ubicación, o bien beneficiar a usuarios que logren ahorro energético. Trabajos como el de [5] presentan nuevos desafíos que conciernen a la privacidad de los datos producidos por este tipo de medidores.

3. Requerimientos del sistema

Un listado de requerimientos que el sistema básico debe cumplir fueron extraídos de una narrativa y de diversas entrevistas con el proveedor del servicio eléctrico.

3.1. Requerimientos funcionales

- *Conectividad remota*: Debe proveerse un esquema de comunicación que permita enlazar grandes distancias, preferentemente, inalámbrica.
- *Penalización al usuario por infracciones*: En este sentido, deben diferenciarse dos tipos de infracciones:
 - *Tamper*: Intento de fraude al método de medición de energía. Comúnmente su detección es posible mediante medición y comparación de corrientes en ambos conductores (fase y neutro).
 - *Exceso de consumo*: El usuario establece por contrato su consumo máximo con el objetivo de no perjudicar a otros usuarios, dañar al equipo de medición o exceder el límite de energía que la red puede proveer. Cada usuario establece sus límites establecidos por contrato y de manera independiente a los demás usuarios.

El incumplimiento de alguna de las condiciones de establecidas por contrato provoca la interrupción automática del servicio eléctrico. Dado que los tiempos de corte así como la potencia demandada máxima son valores establecidos por contrato entre el usuario y la empresa distribuidora, el equipo desarrollado debe proveer la funcionalidad de configuración de estos parámetros. Debe de considerarse que no se trata de un método de seguridad personal (por ejemplo, disyuntor) sino de un mecanismo de protección del equipamiento y de toda la red.

- *Reporte automático del estado del sistema*: Se debe proveer instantáneas del sistema que permitan monitorear estados de las mediciones así como variables internas para administración del equipo de medición.
- *Persistencia de información histórica*: Dado que el sistema está orientado a emplazarse en zonas alejadas, debe proveerse que el sistema almacene todos los registros de estados detallados de cada usuario.

4 Isasmendi, A. Goñi, O., Aguirre, L.

- *Reporte antivandálico*: Ante el intento de destrucción ya sea mediante golpes o bien aperturas del gabinete no autorizadas, el evento deberá ser almacenado y reportado de forma inmediata. Además, el sistema debe alertar ante la presencia de campos magnéticos intensos que intenten alterar los métodos de medición.
- *Resistencia física*: El elemento de medición debe soportar condiciones ambientales desérticas, lo que involucra temperaturas que oscilan entre -5 C de noche y hasta 50 grados centígrados de día. La humedad depende de la temporada y varía entre 30 y 100 %.

3.2. Requerimientos no funcionales

- *Bajo costo de mantenimiento*: El costo asociado al consumo eléctrico del propio equipo así como el costo en la transmisión de datos, debe ser despreciable ante los valores facturados.
- *Diseño extensible*: El sistema debe permitir alterar la cantidad de usuarios sin impactar sobre el hardware ni el software. Se propone la producción de equipos con incremento en la cantidad de usuarios en múltiplos de 10.

3.3. Requerimientos eléctricos y mecánicos

La flexibilidad del sistema debe estar acompañada por un sistema eléctrico que permita su reconfiguración y adaptación a otras aplicaciones. Se han establecido los siguientes requerimientos eléctricos:

- Tensión nominal: Debe permitir configurar el instrumento de medición entre 90-220V
- Corriente máxima: Debe preverse la adaptación del sistema en consumos que van desde los 5A hasta 25A.
- Frecuencia: Según red 50-60Hz
- Clase: El tipo de medidor propuesto debe calificar como clase 2

En la actualidad, una ciudad desarrollada con un tendido eléctrico convencional posee medidores que utilizan el método de medición mecánico, obteniendo una precisión del 5 % [6].

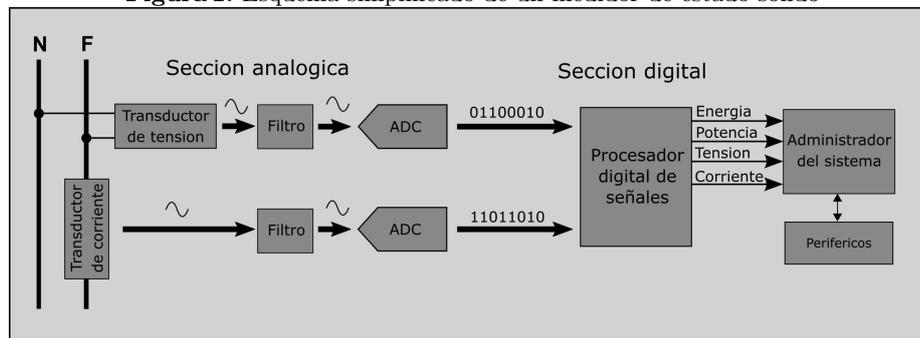
4. Diseño del sistema

El sistema fue diseñado utilizando un enfoque *bottom-up* de modo de poder aumentar la independencia de los subsistemas. Cada capa posee funcionalidades bien definidas. En esta sección primero se presenta cada parte o capa del sistema, luego se presentan las posibles topologías que se pueden obtener recombinaando las partes y finalmente se presenta un caso de aplicación concreto.

4.1. Medidor mono usuario (MMU)

Se trata de un instrumento con capacidad para un único usuario y representa un productor indivisible de información. Cada medidor monousuario reporta estado instantáneo de consumo, tensión e indicadores de fraude. Este componente por sí solo representa una versión extendida de un medidor domiciliario convencional, sólo que en su versión de estado sólido.

Figura 1. Esquema simplificado de un medidor de estado sólido



4.2. Coordinador multi usuario (CMU)

Representa el agrupamiento y coordinación de N medidores monousuario. Este dispositivo posee dos medios de almacenamiento, uno primario y otro secundario. El primario almacena los estados de tensión, corriente y potencia instantáneos, de manera tal que ante un corte de energía no se borren dichos valores. Se utilizó tecnología EEPROM y es posible extraer su contenido mediante sus pines en caso de destrucción total del dispositivo. El almacenamiento secundario contiene información histórica de las mismas variables pero a lo largo del tiempo. Cada conjunto de datos incluye, identificador de usuario y su conjunto de variables observadas junto con la fecha y hora de la muestra provistas por un RTC (Real-Time-Clock). Al contener información más detallada del consumo, es posible utilizar esta información para obtener estadísticas de modo de consumo (ej: Horarios) o bien como prueba ante hechos de fraude. Este instrumento, al poseer un comportamiento independiente, representa un producto por sí mismo que podría utilizarse en el contexto de la inmótica en edificios de departamentos u hoteles. Provee conectividad EIA-485 para conexión con otros dispositivos o bien para su configuración y gestión (Por ejemplo: lectura mensual de consumos).

6 Isasmendi, A. Goñi, O., Aguiere, L.

4.3. Gateway

Recibe este nombre ya que su principal objetivo es ser intermediario entre el exterior y los CMU. Se trata de un dispositivo que permite registrar, programar y configurar CMU de manera tal de proveer flexibilidad al sistema.

Con el objetivo de detectar intentos de sabotaje o aperturas no autorizadas del equipo, se agregan sensores (de apertura, magnéticos, temperatura, humedad y acelerómetros) y algoritmos para su detección. Además posee un conjunto de Entradas/Salidas de uso general configurables por el cliente a su necesidad. Este dispositivo representa el primer nivel de comunicación con el exterior. Mientras que para coordinar los módulos multiusuario utiliza una interfaz EIA-485, para la interacción con otros sistemas provee interfaces Ethernet, PLC (Power Line Control), Serial y USB. La interfaz de usuario para la configuración de este equipo, así como los medidores multiusuario y la descarga de datos *in-situ*, se realiza mediante un servidor web interno (interfaz ethernet) o bien mediante una aplicación Windows (USB, Serial). Al igual que los CMU poseen dos niveles de almacenamiento. El primario almacena configuraciones y variables del equipo así como de los CMU que administra. Además, permite registrar consumos máximos de modo tal de poder ser utilizado en un sistema con esquema pre-pago. El nivel secundario almacena instantáneas del nivel primario y funciona como cache para los datos almacenados en los CMU. Este instrumento, también desarrolla una actividad independiente y puede ser utilizado en edificios o comunidades que requieran un monitoreo *in-situ* o bien remoto siempre que exista una infraestructura de red.

4.4. Módulo de comunicaciones inalámbricas

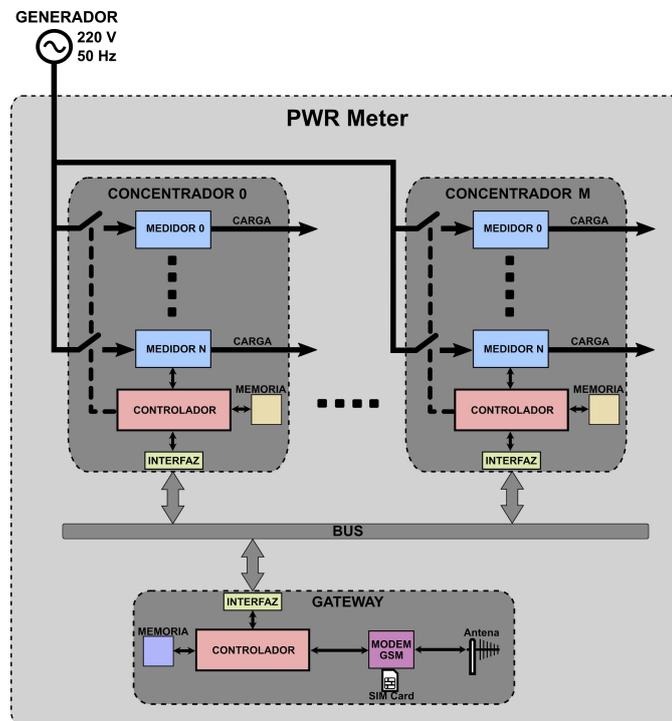
Este módulo permite la telemetría y telecontrol de cada consumidor de energía. Está basado en tecnologías inalámbricas diversas de modo tal que se adecuen a redes eléctricas remotas o de difícil acceso. Entre las tecnologías soportadas se encuentran, módulo 3/4G, radio módem UHF e interfaz para teléfono satelital. Dado el abanico de posibles tecnologías, se implementó un protocolo estándar compatible con distintas tecnologías. Este módulo contiene un esquema de encriptación que brindan cierta seguridad a los datos.

4.5. Host de gestión y administración

Consiste básicamente en un servidor web que permite la gestión remota de CMUs. Posee tres sistemas principales:

- *Capa de comunicaciones*: gestiona las comunicaciones con cada CMU de manera abstracta, es decir, independientemente del medio de comunicación utilizado.
- *Capa de datos*: Registra datos de variables de cada MMU así como sus valores límites.

Figura 2. Esquema de la topología adoptada



- *Tarifador*: Gestiona los consumos y pagos de cada consumidor en particular. Posee la característica de prepago indicando la cantidad de energía máxima que puede consumir.
- *Interfaz de Gestión*: Permite el mantenimiento de los CMU de manera remota. Desde allí se agregan o eliminan usuarios, indicando la relación que tiene el cliente con la boca del CMU.
- *Alertas*: Permite visualizar las alertas producidas por el sistema. En el caso particular de intento de fraude, este módulo sólo reporta la situación ya que la acción de interrupción del servicio se realiza de manera automática. En el caso de un evento vandálico, la alerta debe evaluarse para informar a la autoridad de seguridad competente.

5. Tecnología utilizada

En el proyecto descrito, se utilizaron tecnologías que involucran tanto software embebido como aplicaciones ejecutándose en la nube. En esta sección se da una breve descripción del hardware involucrado así como algunos detalles de la arquitectura de software utilizada en cada nivel.

8 Isasmendi, A. Goñi, O., Aguirre, L.

5.1. Coordinadores multiusuario

Se presenta una arquitectura hardware *Maestro-Eslavos* que involucra un microcontrolador de 32 bits (Maestro) encargado de coordinar el funcionamiento de, en este caso en particular, 10 medidores de estado sólido. Para este trabajo en particular se eligió un $N=10$. En particular, se eligió empíricamente esta granularidad de manera tal de cubrir una vereda convencional. Dado que la encuesta a cada medidor se realiza a un periodo constante y de velocidad (200 hz) considerable, sus registros deben ser muestreados en periodos acordes para evitar el desborde de los mismos. Es por eso que el periodo de muestreo se fijó considerando la mitad del tiempo en que los registros desborden a máximo consumo. La persistencia de datos se realiza en nivel primario con una memoria EEPROM de 256 Mbit. Considerando que la tecnología permite acceso aleatorio, las magnitudes de cada medidor específico son almacenadas en palabras de 32 bits y mediante un cálculo simple es posible acceder directamente a la tupla *Medidor-Magnitud*. Cada palabra admite dos dígitos de precisión. La memoria secundaria está implementada con tecnología Flash NOR, por lo cual las instantáneas son almacenadas en forma secuencial y circular, eliminando los registros más antiguos.

El software se ejecuta sobre un sistema operativo de tiempo real que permite, no sólo el muestreo de los múltiples esclavos en períodos precisos, sino que también es el encargado de la recuperación ante un desperfecto técnico o bien interrupción del suministro. Además gestiona el almacenamiento de instantáneas en memoria secundaria.

5.2. Gateway

Permite la gestión de hasta 20 CMU muestreados a intervalos de tiempo de 15 minutos. El hardware consta de un microcontrolador de 32 bits e idéntico almacenamiento que los CMU. Además provee una interfaz Ethernet de 100 mbps para remota de los datos o bien para acceder a la configuración del dispositivo mediante un servidor web interno.

Dado que la información almacenada por este dispositivo es consultada esporádicamente, tanto el refresco de registro de magnitudes de cada usuario así como el almacenamiento de instantáneas, se realiza a intervalos de 15 minutos permitiendo además pasar el equipo a modo de ahorro de energía. Todas estas características son posibles gracias a que el software embebido también ejecuta un sistema operativo de tiempo real.

6. Resultados

El proyecto se llevó a cabo en un período de 6 meses. En esta sección se detallan algunas métricas del sistema final obtenido.

6.1. Pruebas físicas

Las pruebas del sistema anivandálico fueron llevadas a cabo aplicando sucesivos golpes sobre la estructura. Además se le aplicaron neodimios sobre la caja para detectar fraudes de consumo. Por otro lado, toda la electrónica fue sometida a estrés térmico variando de -40C a 85C controlando humedad y temperatura.

6.2. Desempeño MMU y CMU

El requerimiento de precisión inicial se fijó en el 2%. Inicialmente, se construyó el equipo y luego se sometió una etapa de calibración donde todos los medidores fueron ensayados. El cuadro 6.2 muestra los resultados obtenidos antes y luego de la calibración. El equipo utilizado para las pruebas de calibración es el Schlumberger SM3050 [7].

Cuadro 1. Errores antes y después de la calibración

	Error en tensión	Error en corriente	Categoría
Sin calibrar	5.2 %	4.2 %	5
Calibración 1	0.3 %	0.4 %	0.5
Calibración 2	0.2 %	0.108 %	(>) 0.25

Respecto a la performance de los CMUs se sobredimensionaron los tiempos para el muestreo para evitar el desborde. El cuadro 6.2 presenta los tiempos utilizados, sobredimensionados y el tiempo mínimo en el que podría realizarse la muestra. Esto permitiría que el equipo realice mediciones de hasta más de 20 veces el consumo para el cual fue diseñado o bien para el doble de medidores multiusuario.

Cuadro 2. Tiempos de muestreo

	Periodo de desborde	Periodo de muestra	Periodo máximo
CMU	50 ms	5 ms	2 ms

El cuadro 6.2 resume la capacidad de persistencia del CMU. La capacidad de almacenamiento excede lo establecido, permitiendo a sistemas posteriores, aumentar la cantidad de consumidores.

Cuadro 3. Utilización de almacenamiento secundario

bytes/usuario	bytes/hora (30 usr)	capacidad
5	360	~1 año

10 Isasmendi, A. Goñi, O., Aguirre, L.

6.3. Desempeño server

El software de gestión, administración y tarifador se desplegó en una instancia de Amazon Web Services EC2 [8]. La decisión de elegir esta tecnología se debe a las prestaciones que ésta presenta en lo referente a confiabilidad y disponibilidad. Además, dado que el sistema se implantará geográficamente distante, es necesario contar con una plataforma que permita elegir donde se ejecutará software. Este subsistema realiza sondeos periódicos por la salud de los dispositivos remotos mientras que realiza actualizaciones sobre facturación y estado de cuenta de cada uno de los consumidores que provee. En cuanto al volumen de datos transferidos desde y hacia el dispositivo, se realizan transmisiones periódicas (15 minutos) de paquetes de un kilobyte en ambos sentidos. Esto se debe a que se eligieron cuidadosamente las estructuras y tipos de datos que son utilizados para representar la información. Esto permite realizar un ahorro significativo en el paquete de datos elegido si la comunicación se realiza a través de la red GSM. El tiempo de transmisión de tal paquete es del orden del segundo, despreciable en una plataforma 3G.

7. Comentarios finales y Conclusiones

En el presente texto, se describe la experiencia en el diseño y construcción de un medidor de energía multiusuario. El dispositivo se diferencia con otros dispositivos desarrollados en su alta precisión, flexibilidad y escalabilidad.

Cada medidor de estado sólido en particular fue evaluado antes y después de un proceso de calibración. El equipo sin calibrar presentó una precisión idéntica a los medidores domiciliarios tradicionales (error del 5%) mientras que el equipo calibrado, presentó precisiones de 10 y 20 veces mejores.

Si bien se sobredimensionaron parámetros de diseño (Por ejemplo: tiempo de refresco de medidores y almacenamiento histórico), esta situación permite al dispositivo estar preparado para prestar servicios a grandes consumidores o en diferente configuración con sólo ligeras modificaciones en el Hardware y nulas en el Software.

Luego de completar los trámites de exportación necesarios, el equipo fue enviado al cliente quien realizó una prueba de aceptación. Al momento de redacción de este texto, el dispositivo se encuentra en proceso de instalación en Kenia.

Referencias

1. J. Nkiriiki and T. S. Ustun. Mini-grid policy directions for decentralized smart energy models in sub-saharan africa. In *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, pages 1–6, Sept 2017.
2. M. Byamukama, R. Akol, G. Bakkabulindi, B. Pehrson, R. Olsson, and J. Sansa-Otim. Energy storage options for environment monitoring wireless sensor networks in rural africa. In *2018 IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG 2018)*, pages 1–5, April 2018.

3. Liang Zhishan, Qiu Changtao, and Wang Jinli. A new type intelligent multi-user single phase kwh meter. In *[1992] Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pages 551–554 vol.2, May 1992.
4. Wei Sun and Jian Zhi Tuo. Prepayment electric energy meter with multi-functional for multi-user based on stc11f52xe. 367:211–215, 08 2013.
5. J. Gmez-Vilardeb and D. Gndz. Smart meter privacy for multiple users in the presence of an alternative energy source. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 10(1):132–141, Jan 2015.
6. Instituto Nacional de Tecnología Industrial INTI. Medidores de energía eléctrica activa de inducción, clases 0,5; 1 y 2 (segn norma iec 521/88), June 2011.
7. Schlumberger. Sm 3050 user manual), June 1988.
8. Amazon. Amazon elastic compute cloud (amazon ec2), June 2018.