

Modelado de sensores basado en la Arquitectura MDA para microrredes eléctricas

Sensor Modelling based on MDA Architecture for Electrical Microgrids

Elvis Eduardo Gaona García^{1*}, Cesar Leonardo Trujillo Rodríguez^{1**}, Víctor Daniel Angulo Morales^{2***}

¹ Laboratorio de Investigación en Fuentes Alternativas de Energía, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas

² Grupo de Investigación en Telecomunicaciones de la Universidad Distrital, Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas

FECHA DE ENTREGA: 26 DE NOVIEMBRE DE 2015

FECHA DE EVALUACIÓN: 15 DE FEBRERO DE 2016

FECHA DE APROBACIÓN: 15 DE MARZO DE 2016

Resumen En este artículo se propone un modelo basado en la arquitectura MDA (*Model Driven Architecture*) para el diseño de una red de sensores inalámbricos que monitorea variables de tensión y corriente en una microrred eléctrica. Se describen sus componentes, el módulo sensor, el módulo de procesamiento, y por último el de transmisión de los datos. También se propone un modelo de toma de decisiones compuesto por una carga, la red principal y una fuente de generación con un sistema de almacenamiento de energía.

Abstract In this paper an approach based on MDA (Model Driven Architecture) architecture for design a wireless sensor network in order to monitoring variables of voltage and current in an electrical microgrid model is proposed. Their components are described, the sensor module, the processing module and finally the transmission of data. Also the model of decision making consists of a load, the principal grid and a generation source with an energy storage system is proposed.

Palabras Clave: redes de sensores inalámbricos, Arquitectura MDA, Microgrilla, sistemas de micro-almacenamiento.

Keywords: wireless sensor network, Model Driven Architecture, Microgrid.

* egaona@udistrital.edu.co

** cltrujillo@udistrital.edu.co

*** vdangulom@correo.udistrital.edu.co

1. Introducción

La Generación Distribuida (GD) es una de las alternativas tecnológicas que permite la generación de energía eléctrica lo más cerca posible al lugar del consumo [1]. Este tipo de generación pretende, con la integración de energías limpias y el uso de tecnologías versátiles en control y comunicaciones, mejorar el funcionamiento del modelo centralizado de red eléctrica a una red del futuro: inteligente, interactiva y amigable con el medio ambiente. De esta manera, la inclusión de microrredes eléctricas con fuentes renovables de energía como la eólica y la fotovoltaica, además del desarrollo de métodos eficientes de almacenamiento de energía, permiten solucionar las problemáticas de generación intermitente presentes en estas formas de generación distribuida [2].

La inteligencia en la toma de decisiones y la interactividad entre los elementos de una microrred eléctrica, requiere de una infraestructura de medición, recolección y transmisión de datos que lleve la información desde los diferentes nodos como lo son fuentes de generación y cargas, hasta un nodo central que realiza la gestión de los recursos en una microrred. Una red de sensores inalámbricos WSN (*Wireless Sensor Network*) cumple con los requerimientos de flexibilidad y escalabilidad que este tipo de mediciones requiere, en particular se han utilizado en [3] con el propósito de monitorear el sistema de potencia en microrredes eléctricas.

Las redes de sensores presentan diferentes tipos de inconvenientes y restricciones por el *hardware*, y protocolos de comunicación que varía respecto al fabricante de los dispositivos, por lo tanto el *software* construido para este tipo de redes presenta características únicas e incompatibles con otros tipos de *software*, es así como el despliegue de este tipo de redes a través del modelo MDA (*Model Driven Architecture*) permite adaptar un estándar generalmente utilizado para desarrollo de sistemas distribuidos grandes, permitiendo que este tipo de redes se implementen transparentemente a sus tecnologías, fabricantes y otras variantes que actualmente presentan cada uno de los sensores, más aún presentar a los usuarios finales un sistema independiente de la plataforma centrado en componentes.

2. Generalidades

2.1. Concepto de microrred

La microrred comprende una parte del sistema de distribución eléctrica en media y baja tensión. Incluye una variedad de recursos energéticos distribuidos (DER) tales como generadores distribuidos y unidades de almacenamiento de energía, y diferentes tipos de usuarios finales (cargas eléctricas y/o térmicas), así como equipos de comunicación necesarios para la operación y el manejo de energía en tiempo real del sistema [2]. Esta sirve a una gran variedad de clientes, tales como, edificios de viviendas, entidades comerciales, parques industriales, zonas no interconectadas, etc. [4]; la microrred tiene la capacidad de importar y exportar energía de forma flexible desde y hacia la red, controlar el flujo de potencia activa y potencia reactiva, y gestionar manejar el almacenamiento de energía [5].

En los últimos años, una de las grandes prioridades a escala mundial es el desarrollo de fuentes alternativas de generación de energía eléctrica, y en especial el aprovechamiento de fuentes renovables y energías limpias que produzcan una baja contaminación ambiental. Si bien los combustibles fósiles continuarán sufriendo una fracción apreciable del consumo energético, la oferta energética tenderá a ser más diversificada. Opciones como la energía, eólica, solar, biomasa renovable e hidrógeno juegan un papel importante en el largo plazo y producirán cambios substanciales en el perfil tecnológico ambiental y organizacional del sistema energético global [6].

2.2. Tipos de microrredes

La clasificación de una microrred eléctrica depende de factores tales como: el tipo de generación empleado, de las cargas a alimentar y la disposición física de la microrred, entre otras. Sin embargo, la clasificación más simple se puede dar en términos de la forma de onda de la señal de tensión generada, es decir, si la microrred eléctrica es en corriente directa (DC) o en corriente alterna (AC).

En [7], [8], y [9] se plantea el uso de microrredes eléctricas basadas en corriente directa. En este tipo de configuración los diferentes sistemas de generación se conectan a través de convertidores a un bus (nodo o barra) DC donde también se conectan las cargas y los sistemas de almacenamiento. En el caso de requerir la conexión de cargas AC, se tiene un inversor que asegura las condiciones de calidad de energía adecuadas. En la Figura 1 se muestra una microrred en DC.

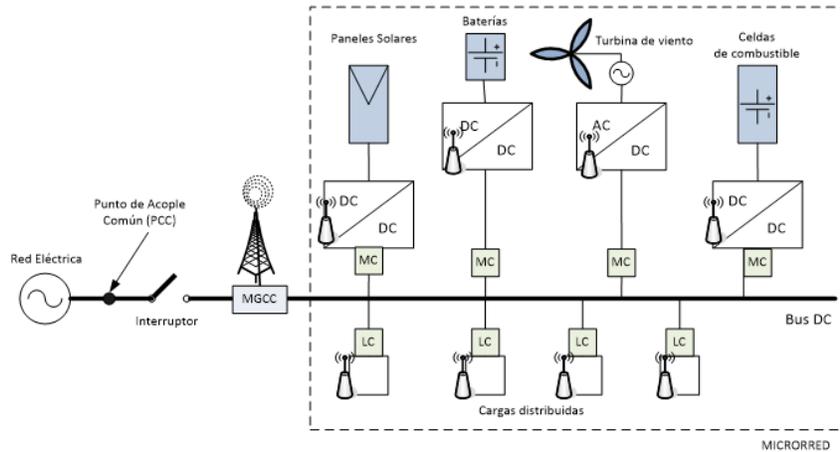


Figura 1. Microrred en DC.

Una clasificación adicional que se le puede dar a las microrredes en DC depende del nivel de tensión con el que se trabaje. De esta manera es posible trabajar con tensiones producto de la rectificación de sistemas AC monofásicos

o trifásicos, o trabajar con tensiones DC típicas, como por ejemplo, los 48 V utilizados en muchos esquemas y trabajos [9]. Generalmente este nivel de tensión es usado por razones de seguridad para el usuario.

Por otra parte, en las microrredes de corriente alterna los sistemas de generación y las cargas conectadas se conectan a través de convertidores a un bus AC. Los sistemas de almacenamiento y las cargas en DC requieren de convertidores que adecúan la energía del bus AC a sus características particulares. Adicionalmente, el bus se conecta en un único punto a la red eléctrica. En la Figura 2 se muestra la configuración de una microrred en AC.

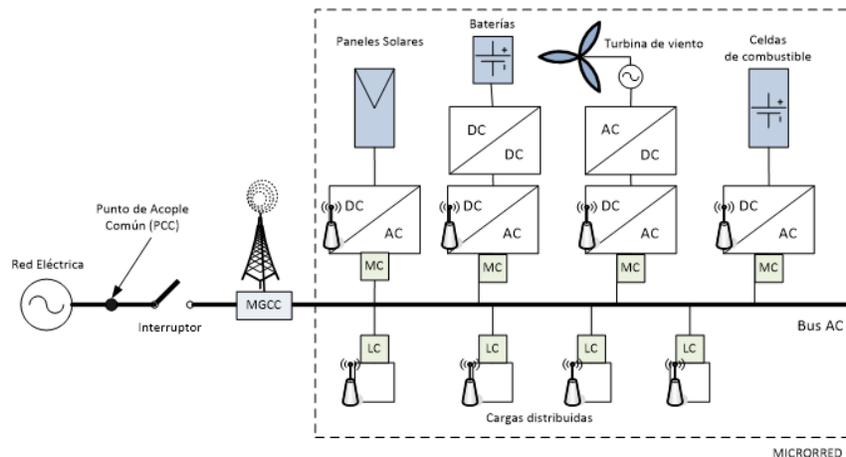


Figura 2. Microrred en AC.

Dentro de las microrredes en AC se presentan diversas posibilidades de clasificación en función del nivel de tensión a la que se opere, así como al tipo de sistema (monofásico o trifásico). Aunque es común encontrar muchos estudios de sistemas en baja tensión [10], también es posible encontrar aplicaciones de microrredes a nivel de media tensión [11].

3. Modelo MDA

En los sistemas distribuidos actuales, se han enfocado en la búsqueda de soluciones abiertas y reusables, donde sus componentes *hardware* y *software* sean creados independientes por muchos fabricantes, y que su uso e interoperabilidad sea garantizada, con fácil configuración e implementación, para llegar a esto se han tomado el modelo MDA [12], que define tres puntos de vista del sistema, que buscan abstraer una realidad compleja a una serie de modelos más sencillos. El primero punto de vista es CIM [13] (*Computing Independent Metamodel*), es un punto de vista independiente de la computación, el segundo punto de vista

es PIM [14] (*Platform Independent Metamodel*), punto de vista independiente de la plataforma y el tercero es PSM (*Platform Specific Metamodel*), este es el específico de la plataforma.

Al tomar cada uno de los puntos de vista se tiene toda una metodología para sistemas distribuidos, el CIM busca los requerimientos del problema, y el vocabulario único del sistema, de hecho este modelo CIM son plasmados por expertos del dominio. El PIM busca describir el funcionamiento del sistema mediante un enfoque computacional pero sin que los conceptos que se usen, sean únicos de una plataforma concreta. Es decir que son válidos si el modelo es aplicado a todas las plataformas que se manejaran dentro del sistema. Y por último el PSM, este modelo busca describir el sistema mezclando el modelo PIM con detalles de la plataforma, es decir que si para un sistema intervienen un número n de plataformas únicas, se podrán generar n modelos PIM y cada uno de ellos es válido para una plataforma solamente.

Aunque MDA define tres tipos de modelos según su abstracción, no es una clasificación obligatoria, se pueden tener una gran cantidad de modelos, esto se ve en la posibilidad de tener en el modelo PIM distintos niveles de abstracción, al igual que en el modelo PSM, al variar las plataformas y las tecnologías únicas en que intervienen y campos de acción tan diferentes, se pueden generar distintos niveles y modelos. También introduce un modo de transformación para cambiar entre modelos, hasta llegar a transformarse en código, este tipo de transformaciones idealmente deben automatizarse y ejecutarse por herramientas. De esta forma al obtener una transformación automática entre dos niveles de abstracción, se requiere definir un conjunto de reglas, que describan como un modelo en un lenguaje específico puede transformarse en un modelo en el lenguaje destino. Este conjunto de reglas describen como una construcción en el lenguaje origen pueden transformarse en construcciones de un lenguaje destino.

4. Red de sensores inalámbricos en microrredes eléctricas

Una de red de sensores es una infraestructura comprendida por elementos de medida, computación y comunicación que proveen a un administrador la capacidad de observar y reaccionar a eventos y fenómenos que pueden ocurrir dentro de un ambiente específico [15]. Su componente principal puede definirse como un conjunto de dispositivos autónomos llamados Nodos sensores, los cuales se encuentran equipados con pequeñas interfaces de comunicación generalmente inalámbrica y adicionalmente con herramientas que le permiten realizar mediciones de distintos parámetros, tales como la humedad, la temperatura y la luz. Estos Nodos vienen equipados con pequeños microprocesadores y se alimentan generalmente mediante baterías, lo que hace imprescindible utilizar elementos que prioricen el ahorro de energía.

La red de sensores inalámbricos tiene como objetivo la colaboración entre sí de pequeños nodos [15], con el propósito de realizar mediciones en tiempo real de diversas variables. Este concepto es relativamente nuevo, sin embargo, sus aplicaciones se han dado en campos como la domótica, entornos militares, detección

ambiental . A continuación se muestran las características más importantes que deben cumplir una red de sensores dentro del modelo de una red inteligente de energía eléctrica:

- Eficiencia: el bajo consumo energético del nodo sensor es un punto importante, debido a que se ubican en locaciones donde no se disponen de sistemas fijos de alimentación.
- Escalabilidad: debido al despliegue progresivo de la red, es necesario mantener las condiciones de la red al aumentar la cantidad de nodos.
- Tiempo real y comunicación: Los datos deben entregarse dentro de un intervalo de tiempo considerable dependiendo la aplicación, para este propósito generalmente se usa protocolos como Zigbee.

Los nodos sensores, tienen una capacidad limitada de cómputo y comunicación, debido a esto su tiempo de vida es directamente proporcional a la fuente de alimentación o batería. Estos nodos llamados en la literatura como mote [16] (motas), por su tamaño y ligereza; al disponer de un sistema de procesamiento, son capaces de pre-procesar la información y transmitirla inalámbricamente hacia otro destino o hacia otra mota. Las partes de un nodo sensor se puede observar en la figura 3.



Figura 3. Componentes de un nodo sensor.

5. Arquitectura MDA sobre la red de sensores inalámbricos

La arquitectura MDA (*Model Driven Architecture*) dentro de las plataformas de las WSN (*Wireless Sensor Network*) dispone de múltiples protocolos, plataformas y campos únicos. El objetivo que se persigue es que estos puedan coexistir mediante una representación basada en modelos, y puedan transformarse en modelos con un nivel de abstracción menor, para lograrlo se plantean los siguientes requerimientos de la arquitectura en particular para una red de sensores [17].

- Abstracción: debe ser de un alto nivel, los desarrolladores no deben estar pendientes de los detalles del nodo o mota, como lo son *hardware* y *software*.
- Desarrollo basado en componentes: se debe permitir la reutilización del código y compatibilidad entre distintos componentes.
- Transformación a nivel de programación o lenguaje de maquina: un modelo inicial con un alto nivel de abstracción debe permitir su transformación a través de otros modelos hasta tener el modelo de código para el sensor o nodo.
- Limitaciones de *Hardware*: debe ser fácilmente escalable y compatible con los protocolos y *hardware* específico de desarrollo.

El modelo que se plantea en MDA, como transformación PIM se puede observar en la figura 4.

La arquitectura se centra en capturas y comunicación entre los nodos, para esto el modelo PIM describe el funcionamiento del sistema mediante un enfoque computacional. Los conceptos de MDA se definen centrados en la existencia o planteamiento de un sistema [18], que puede contener un simple sistema informático, combinaciones de componentes en diferentes sistemas informáticos, o diferentes sistemas en diferentes organizaciones.

Adicionalmente, la arquitectura MDA determina los tipos de modelos que deben usarse, como preparar dichos modelos y las relaciones que existen entre los diferentes modelos. La transformación de modelos es el proceso de convertir un modelo en otro modelo del mismo sistema.

La Figura 5 muestra la transformación del modelo independiente de la plataforma (PIM) en un modelo específico PSM para una plataforma mediante el uso de información añadida que permita trazar ambos modelos, a esto se le conocen como mapas de transformación, donde se especifican las reglas de un PIM a un PSM para cada plataforma en concreto. Estos mapas incluyen los metamodelos y sus reglas haciendo uso del lenguaje computacional de específico [19].

6. Arquitectura MDA en una microrred eléctrica

La arquitectura MDA define tres puntos de vista del sistema, que buscan abstraer una realidad compleja a una serie de modelos más sencillos. El primero punto de vista es el independiente de la computación CIM (*Computing Independent Metamodel*), el segundo punto de vista es independiente de la plataforma PIM

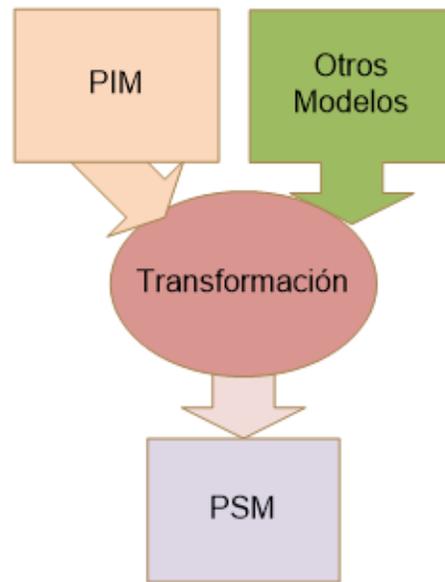


Figura 4. Transformación entre modelos PIM-PSM.

y el tercero el específico de la plataforma PSM [20]. La arquitectura va a estar centrada en la captura y comunicación de los sensores que están conectados a una microrred eléctrica [21], para esto solo se tomó el modelo PIM y el concepto definido por MDA de transformación entre modelos que permite describir el funcionamiento del sistema mediante un enfoque computacional.

Para el caso de captura, el modelo se describe representando al nodo como un sistema, este nodo está conectado a los elementos que hacen parte de una microrred eléctrica, como fuentes de alimentación y cargas que tienen como objetivo la captura de datos con una entrada y una salida; la variable de entrada es el valor que se desea medir con el sensor voltaje o corriente. El nodo se describe con dos variables, tipo y valor, donde tipo toma el nombre físico de la variable medida y valor es el número que entra al nodo como se muestra en la figura 6.

Debido a que el nodo es capaz de hacer un pequeño pre-procesamiento, la salida del nodo tiene un dato unificado entre dos valores, que sin importar el tipo de nodo o valor que se mida, no va a variar entre nodos. Por otro lado, el segundo modelo PIM busca dar solución a la incompatibilidad de protocolos de comunicaciones, unificando los diferentes protocolos de comunicaciones de cada uno de los nodos, para este propósito se tiene un dispositivo de intercambio de protocolos transparente al usuario en la arquitectura de desarrollo de WSN, aunque también es posible plantear el modelo PIM de este método de transformación como se muestra en la figura 7.

En la figura 8 se muestra un tercer modelo PIM con un nivel de abstracción menor al anterior. Este modelo describe el siguiente nivel de abstracción que incluye las principales partes del nodo [22], sin que sean únicos de la plataformas

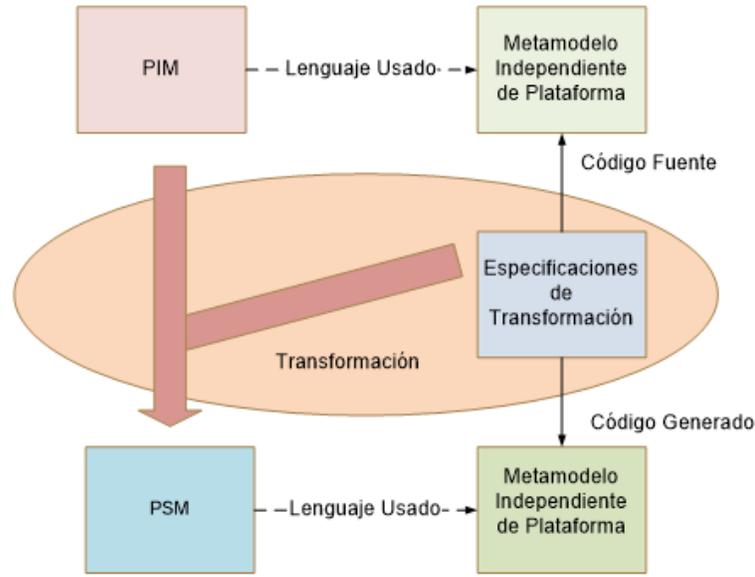


Figura 5. Especificaciones de transformación MDA.

de los nodos actuales. Se describen sus componentes, y cada uno de ellos se pueden comportar como un sistema que será separado de la plataforma específica, el primer módulo que describe el nodo es el sensor, encargado de capturar la variable física y transformarla en una señal eléctrica, esta señal entra directamente al módulo de procesamiento, capaz de pre-procesar y entregar la información al último módulo encargado de transmitir la información inalámbricamente.

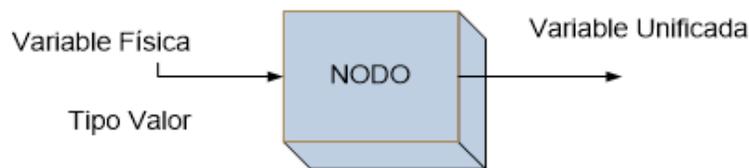


Figura 6. Modelo PIM, de un sensor “Nodo”

El punto crítico en el modelamiento es la metodología de transformación entre los niveles, la arquitectura propuesta está basada en el nivel 1 de abstracción, las transformaciones son propias del desarrollo, lo que le permitiría a los diferentes usuarios finales de las redes solo tener las variables de entrada y salida de cada uno de los sensores y su interconexión con otros sensores, conformando toda una red unificada que captura de datos en una microrred eléctrica. Esto permitiría llegar

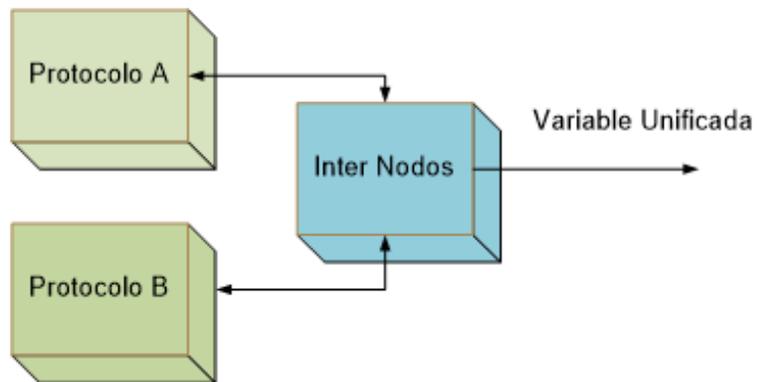


Figura 7. Modelo PIM, interconexión entre “nodos”.

a usuarios finales que no son expertos en desarrollo en este tipo de tecnologías emergentes, facilitando así la unión de componentes.

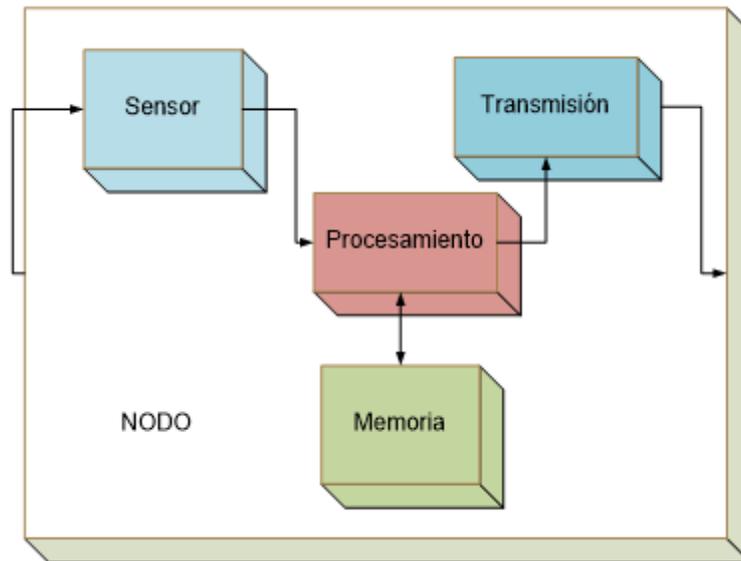


Figura 8. Modelo PIM, módulos de un “Nodo”.

6.1. Acercamiento a un modelo de toma de decisiones

Para la formulación del modelo de toma de decisiones se parte de un modelo sencillo mostrado en la figura 9, compuesto por una carga, la red principal y

una fuente de generación de energía, esta última cuenta adicionalmente con un sistema de almacenamiento. La carga es cualquier sistema cuyo propósito es el consumo energía eléctrica en una sola dirección y no tiene la capacidad de proveerla a la distribución principal; las fuentes de generación de energía contempladas son: paneles fotovoltaicos, fuente de biogás y generadores eólicos; adicionalmente el sistema de almacenamiento de energía y el regulador de la fuente de generación. Cada uno de estos componentes está siendo monitoreado por Sensor_carga, Sensor_Amacenaje y Sensor_Fuente respectivamente.

El principal componente de este modelo unitario es el actuador mostrado en la figura 10, que une la sección de carga y la sección de alimentación, bien sea por distribución o red principal o por fuentes alternativas, diseñado para cuatro estados. Cada uno de sus estados permite que la microrred eléctrica maneje de forma adecuada las fuentes de energía, basada en las mediciones de los sensores de carga, sensor de almacenamiento de energía y sensor de la fuente alterna, no se contempla en el modelo la medición con sensores sobre la distribución principal y se tiene el criterio que esta distribución principal está en la capacidad de suministrar y recibir energía.

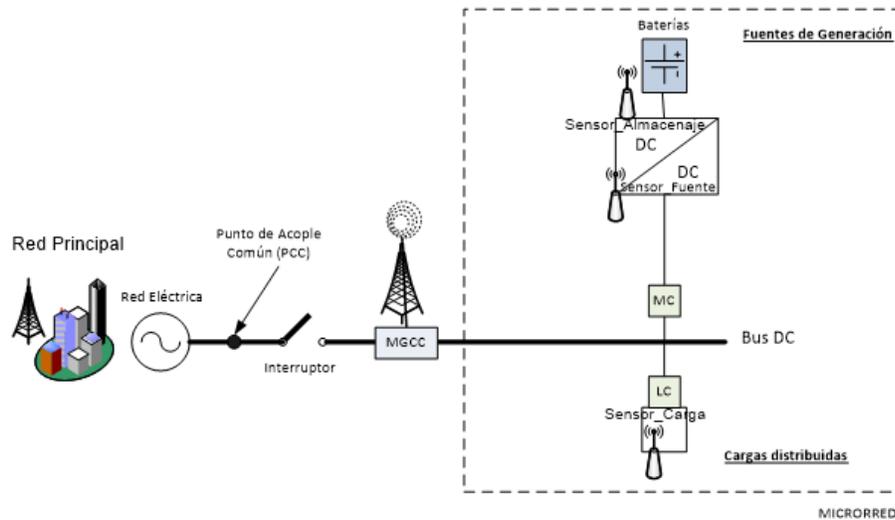


Figura 9. Modelo unitario de microrred eléctrica.

- A. Estado 1: Este estado se presenta en la Microrred eléctrica cuando existe una carga conectada y la fuente de generación está en la capacidad de suministrar energía a la red. El actuador desconecta la red principal y mantiene conectada la Fuente Alternativa y el almacenamiento de energía. Adicional a esto mantiene el estado hasta que se desconecte la carga.
- B. Estado 2: Este estado se presenta en la Microrred cuando existe una carga conectada y la fuente de generación no está en la capacidad de suministrar

energía a la red. El actuador conecta la microrred a la red principal, desconectando la fuente de generación, adicionalmente el estado se mantiene hasta que se desconecte la carga.

- C. Estado 3: Este estado se presenta en la Microrred cuando no hay carga conectada a la microrred, adicionalmente la fuente de generación está en capacidad de suministrar energía a la red. El actuador conecta tanto la red principal como la fuente de generación. Este estado permite que la fuente de generación entregue energía hasta que se conecte la carga o no esté capacidad de suministrar energía.
- D. Estado 4: Este estado se presenta en la Microrred cuando no hay carga conectada a la microrred, adicional a esto la fuente de generación no está en capacidad de suministrar energía a la red. El actuador desconecta la red principal, y la fuente de generación. Este estado permite que la fuente de generación entregue energía al sistema de almacenamiento (baterías) hasta que se conecte la carga o se cumplan los parámetros mínimos para suministrar energía a la red.

El modelo también contempla los sensores que deben estar presentes en una microrred eléctrica que interactúan con generadores eólicos, solares y con combustible biogás, la descripción de Sensores_Fuentes se muestran en la figura 11, estos sensores están intrínsecamente relacionados con los actuadores locales del generador por lo que se especifican variables que son centralizadas en el modelo, la primera medida que toma el sensor es el estado de alarma o emergencia actual de la fuente de generación a la cual el sensor está monitoreando, esta medida se utiliza para alertar al control central si hay algún tipo de fallo dentro de la fuente de generación. La segunda medida del sensor es el estado de conexión hacia la microrred eléctrica, la tercera es la medición de los valores de corriente y voltaje actuales de la fuente de generación, si se presenta algún error en estos valores, el sensor transmite una alarma hacia la red de sensores conectado, por último en los sensores conectados a la fuente eólica y la fuente de biogás se contempla una retroalimentación de las revoluciones por minuto del generador para verificar su funcionamiento.

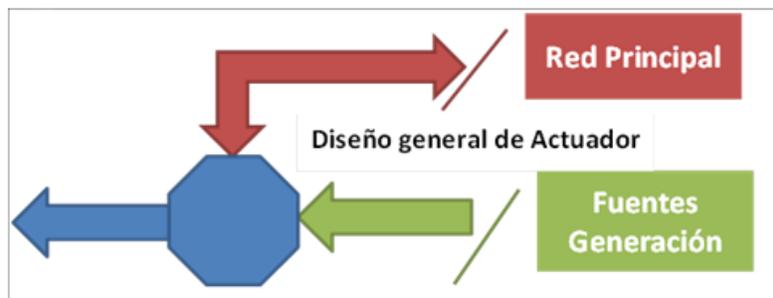


Figura 10. Modelo actuador de la microrred eléctrica.

Los sensores encargados de las cargas conectadas a la microrred se modelan como Sensores_Carga y se muestran en la figura 12. Las tres medidas asociadas a este sensor son: Estado de emergencia, el estado de conexión de la carga a la microrred, y por último los niveles de voltaje y corriente; con este último ítem se mediría el consumo en periodos de tiempo finitos de cada una de las cargas presentes en la microrred y así lograr establecer acciones correctivas para su funcionamiento.

Sensores_Fuentes	Tipo de Medida	Valores
Biogás/Eólica	Estado_Alarma	A=Alarma N=Normal
	Estado_Conexión	C=Conectado D=Desconectado
	Data_Corriente	I
	Data_Voltaje	V
	Parametro_RPM	rpm
Panel Solar	Estado_Alarma	A=Alarma N=Normal
	Estado_Conexión	C=Conectado D=Desconectado
	Data_Corriente	I
	Data_Voltaje	V

Figura 11. Descripción Sensores_Fuente.

Por último el sensor encargado de monitorear Sensor_almacenamiento de energía se muestra en la figura 13. Los sistemas de almacenamiento tienen tres medidas, la primera medida se encarga de verificar si el sistema de almacenamiento de energía presenta alguna alarma o emergencia, la segunda medida es la verificación de conexión o desconexión a la microrred, y la tercera medición es el porcentaje de nivel de carga de la fuente de almacenamiento.

El algoritmo mostrado en la figura 14, inicia con la lectura de los sensores, para el caso específico del modelo unitario, se toman medidas de los tres sensores por cada componente de la Microrred, C_Sensor que corresponde a sensor de la carga, A_Sensor que corresponde al sensor de almacenamiento de energía y a F_Sensor que corresponde a la fuente de generación.

La medición de los sensores es la base de cada iteración del modelo, estos valores evalúan si existe una carga conectada dentro de la microrred, para esto se utiliza el tipo de medida Estado_Conexión. En el caso en el que no se cuente con

Sensores_Carga	Tipo de Medida	Valores
Carga	Estado_Emergencia	A=Emergencia N=Normal
	Estado_Conexión	C=Conectado D=Desconectado
	Data_Corriente	I
	Data_Voltaje	V

Figura 12. Descripción Sensores_Carga.

Sensores_Almacenamiento de energía	Tipo de Medida	Valores
Almacenamiento de energía	Estado_Emergencia	A=Emergencia N=Normal
	Estado_Conexión	C=Conectado D=Desconectado
	Data_NivelCarga	Ca[%]=Porcentaje de Carga
	Data_Voltaje	V

Figura 13. Descripción Sensores_Almacenamiento de energía.

una carga conectada, se verifica el estado de carga en porcentaje Data_NivelCarga, basado en este estado se procede a indicarle al actuador en qué estado se debe posicionar, si el nivel de carga del almacenamiento de energía se encuentra por encima del 95 %, el actuador se ubica en el Estado 3, donde se va a suministrar energía a la red principal de la microrred, Si este valor está por debajo del 95 %, el actuador se posicionara en el estado 4, donde la fuente de generación se desconectara e iniciara la carga sobre el sistema de almacenamiento de energía.

El modelo también contempla cuando se encuentra una carga conectada en el sistema, para lo cual se verifica si el nivel de carga del almacenamiento de energía está por encima del 60 %, para este caso el actuador se posicionara en el Estado 1, donde el almacenamiento de energía y las fuentes de generación serán las que suministren energía a la carga, en caso contrario el sistema de almacenamiento de energía no cumple los requerimientos y la Red principal estará conectada a la microrred.

Este proceso se repite n cantidad de veces durante el tiempo en que los sensores monitoreen la Microrred, el modelo adicionalmente tiene un sistema de emergencia, en cada uno de sus componentes, esto permite que en cualquier momento del algoritmo se presente un incidente dentro de la red y se tome la acción correctiva, por ejemplo, si el sensor de la fuente eólica tiene en Estado_Alarma

= Alarma, nunca se realice su conexión hasta que el estado cambie de valor a Normal, esto permite el aislamiento de los componentes y no afecten el correcto funcionamiento del sistema.

Partiendo del modelo unitario mostrado en la figura 15, el escalamiento de la estructura del modelo para n cargas y n fuentes alternas, siguen los mismos principios del modelo unitario, agregando actuadores por cada fuente de generación involucrada en la microrred.

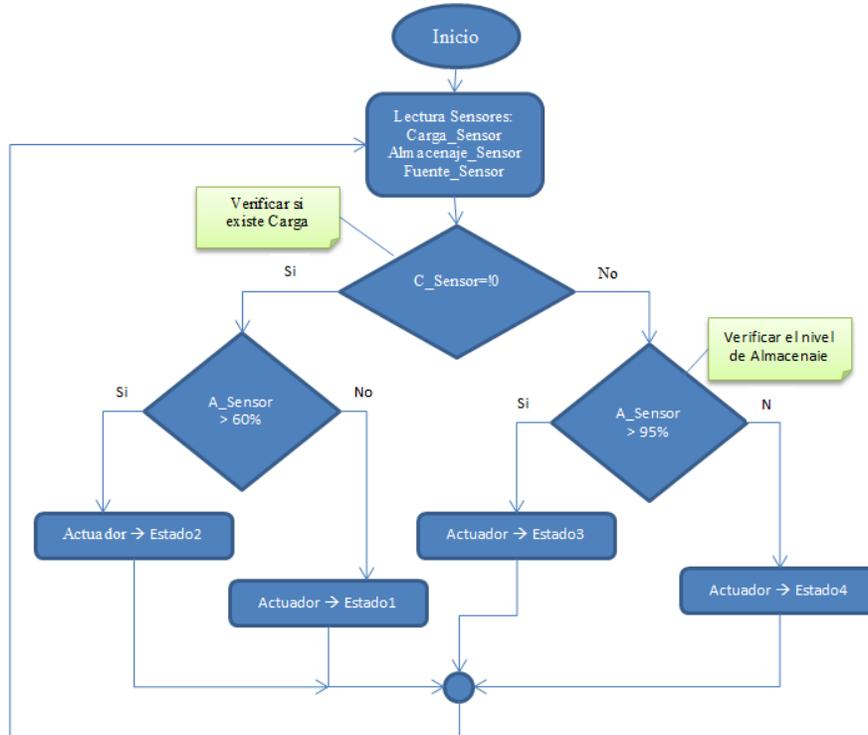


Figura 14. Algoritmo para modelo unitario de la microrred eléctrica.

El algoritmo que describe el comportamiento de los actuadores se muestran en las figuras 16, 17, 18 y 19, este algoritmo inicia verificando el número de cargas presentes en el sistema, para este caso verifica el Sensor_Carga y el tipo de medida Estado_Conexión, con este valor se puede saber cuándo una carga se conecta o desconecta a la microrred y dependiendo de esto tomar decisiones con respecto a los actuadores que se encuentran en las fuentes de generación y la red principal.

El algoritmo después de verificar el número de cargas conectadas en el sistema, evalúa si este valor es mayor a cero y se divide en dos decisiones globales. La primera es cuando existen cargas conectadas por lo que se verifican las fuentes de generación, su calidad de energía y el nivel de carga del sistema de almacenamiento. La segunda decisión es cuando no se presenta carga alguna, y el actuador de la

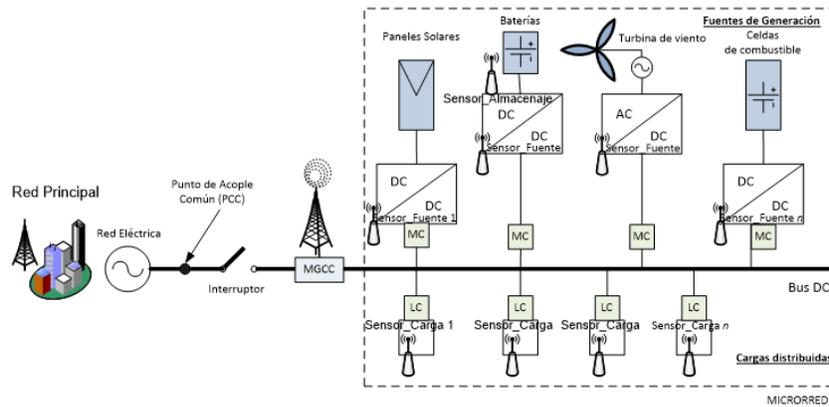


Figura 15. Modelo multi-nodal de microrred.

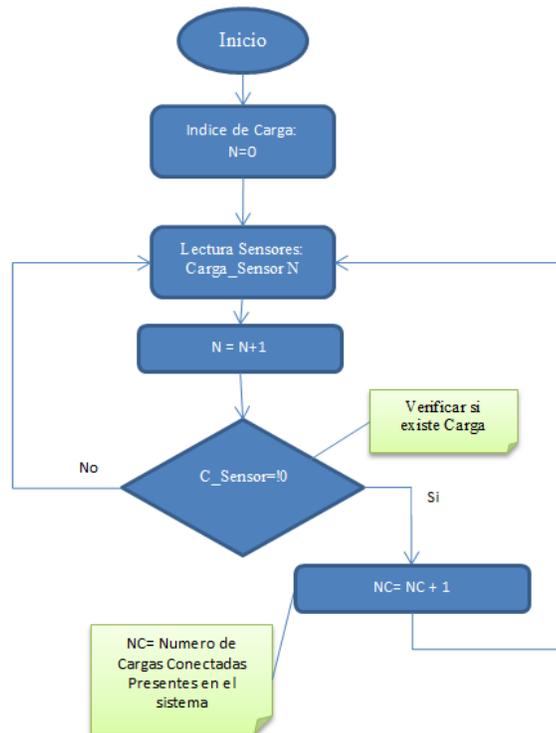


Figura 16. Algoritmo parte I modelo multi-nodal de microrred.

red principal se desconecta de la red de cargas, solo permitirá que se suministre energía de las fuentes de generación, o el Estado 3 en los actuadores.

En la primera decisión Global, se verifica la capacidad de generación de cada una de las fuentes de generación; los actuadores individuales de cada fuente y almacenamiento de energía se ubicaran en el Estado1, del modo contrario

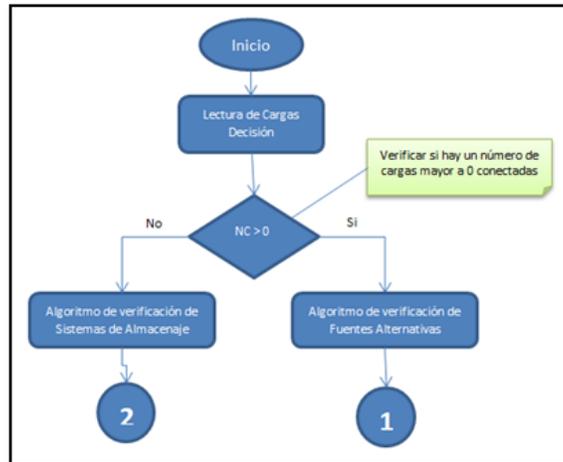


Figura 17. Algoritmo parte II modelo multi-nodal de microrred.

se ubicaran en el Estado4, que permite que la fuente cargue el sistema de almacenamiento de energía. Cuando está conectada alguna fuente de generación a la microrred, el modelo desconecta la red principal, hasta que el total de las fuentes no sean capaces de suministrar energía a las cargas conectadas.

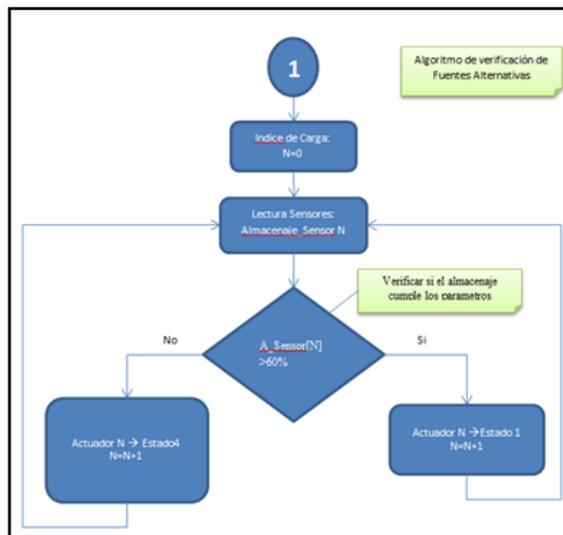


Figura 18. Algoritmo parte III modelo multi-nodal de microrred.

Por último cuando no se presenta una carga conectada en la microrred, el modelo verifica los sistemas de almacenamiento de energía y de fuente de generación, si estos cumplen con los mínimos requerimientos para suministrar

energía a la red principal, los actuadores se ubicaran en el Estado3, de lo contrario cada actuador se encontrar en el Estado4, para que la fuente cargue el sistema de almacenamiento de energía.

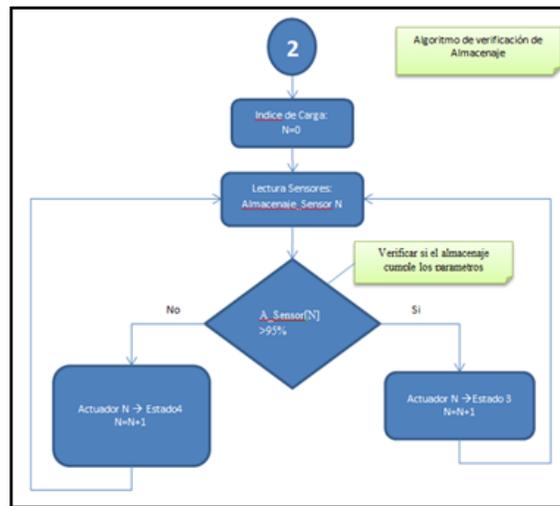


Figura 19. Algoritmo parte IV modelo multi-nodal de microrred.

7. Conclusiones

El acercamiento a un modelo de toma de decisiones en una Microrred, se centra en variables generales como voltaje, corriente, potencia, y control de fallos, pero se crea el marco general para incluir descripciones como, oferta y demanda de energía en el mercado actual, y modelos de predicción para consumo eficiente sobre la Microrred, estos modelos específicos se pueden agregar haciendo uso de la arquitectura MDA, sin afectar los modelos existentes y la compatibilidad con plataformas específicas.

La arquitectura de Red de WSN para microrredes eléctricas, es una arquitectura modular dividida en capas, que implementa un gran número de protocolos en cada capa. En el nivel de la comunicación *Wireless* se deben contar con un servicio de transmisión de datos en tiempo real, altamente confiable y capaz de competir con otras tecnologías de transmisión cableada, los protocolos actuales permiten que se pueda contemplar este tipo de comunicación, que depende a su vez de factores como el ancho de banda, esto debe ser planeado con cuidado, tomando aspectos técnicos, como tipos de codificación, tecnologías WAN utilizadas y tecnologías de última milla disponibles, con el fin de proveer un ancho de banda suficiente para proveer una disponibilidad cercana al 100 %, debido a la incidencia que tienen los sensores sobre la red eléctrica.

El uso de la arquitectura MDA permite a usuarios finales sin experiencia en el desarrollo de tecnologías emergentes facilitando la unión de componentes y las ventajas que ofrece este tipo de desarrollos es una solución factible para desplegar cualquier tipo de red de sensores en una Microrred.

Referencias

1. H. B. Puttgen, P. R. Macgregor, and F. c. Lambert, "Distributed generation: Semantic hype or the dawn of a new era?," *Power and Energy Magazine, IEEE*, no. february 2003, p. 8, 2003.
2. H. Hussein, S. Harb, and N. Kutkut, "Design considerations for distributed micro-storage systems in residential applications," in *Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 32nd International.*, 2010, p. 6.
3. R. V. P. Yerra, A. K. Bharathi, P. Rajalakshmi, and U. B. Desai, "WSN based power monitoring in smart grids," in *Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP), 2011 Seventh International Conference on*, 2011, pp. 401–406.
4. N. D. Hatziargyriou, S. Member, I. A. Dimeas, S. M. Ieee, A. G. Tsikalakis, and S. Member, "Management of Microgrids Environment in Market."
5. J. Guerrero, J. Vasquez, J. Matas, L. G. de Vicuña, and M. Castilla, "Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids, A general approach toward standardization," *Ind. Electron. IEEE Trans.*, vol. 58, no. 1, pp. 158–172, 2011.
6. R. Burrett, R. Dixon, M. Eckhart, D. Hales, and A. Kloke-lesch, "Renewable Energy Policy Network for the 21st Century REN21 Steering Committee," Paris, 2009.
7. K. Shenai and K. Shah, "Smart DC micro-grid for efficient utilization of distributed renewable energy," *Energytech*, 2011 IEEE, 2011.
8. W. Jiang and Y. Zhang, "Load Sharing Techniques in Hybrid Power Systems for DC Micro-Grids," in *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2011, pp. 1–4.
9. A. Kwasinski and P. Krein, "A microgrid-based telecom power system using modular multiple-input dc-dc converters," in *Telecommunications Conference, 2005. INTELEC'05. Twenty-Seventh International*, 2005, pp. 515–520.
10. J. Quesada, R. Sebastián, M. Castro, and J. a. Sainz, "Control of inverters in a low voltage microgrid with distributed battery energy storage. Part I: Primary control," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 114, pp. 126–135, Sep. 2014.
11. W. Huang, "Power flow analysis of a grid-connected high-voltage microgrid with various distributed resources," in *2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering*, 2011, pp. 1471–1474.
12. A. G. Kleppe, J. Warmer, W. Bast, and M. D. A. Explained, *The model driven architecture: practice and promise*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, 2003.
13. C. Hahn, C. Madrigal-Mora, and K. Fischer, "A platform-independent metamodel for multiagent systems," *Auton. Agent. Multi. Agent. Syst.*, vol. 18, no. 2, pp. 239–266, 2009.
14. G. Benguria, X. Larrucea, B. Elvesaeter, T. Neple, A. Beardsmore, and M. Friess, "A platform independent model for service oriented architectures," in *Enterprise interoperability*, Springer, 2007, pp. 23–32.
15. I. Khemapech, "Feasibility Study of Direct Communication in Wireless Sensor Networks," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 21, pp. 424–429, Jan. 2013.

16. F. Escolar, S. Carretero, J. García, F. Isaila, F., “Acabando con los desarrollos Ad-Hoc en Wireless Sensor Networks,” 2006, p. XVII Jornadas de Paralelismo.
17. G. Engels, R. Heckel, and J. M. Kuster, “Rule-based specification of behavioral consistency based on the UML meta-model,” in UML 2001 The Unified Modeling Language. Modeling Languages, Concepts, and Tools, Springer, 2001, pp. 272–286.
18. T. C. Rodrigues, P. V. Dantas, F. C. Delicato, P. F. Pires, C. Miceli, and L. Pirmez, “Using MDA for building wireless sensor network applications,” in Proceedings - 4th Brazilian Symposium on Software Components, Architectures and Reuse, SBCARS 2010, 2010, pp. 110–119.
19. T. Rodrigues, T. Batista, and A. Y. Zomaya, “Model-Driven Approach for Building Efficient Wireless Sensor and Actuator Network Applications,” pp. 43–48, 2013.
20. K. Czarnecki and S. Helsen, “Classification of model transformation approaches,” in Proceedings of the 2nd OOPSLA Workshop on Generative Techniques in the Context of the Model Driven Architecture, 2003, vol. 45, no. 3, pp. 1–17.
21. A. Clark and C. J. Pavlovski, “Wireless Networks for the Smart Energy Grid: Application Aware Networks,” Computer (Long. Beach. Calif)., vol. II, 2010.
22. W. B. Heinzelman, A. L. Murphy, H. S. Carvalho, and M. A. Perillo, “Middleware to support sensor network applications,” Network, IEEE, vol. 18, no. 1, pp. 6–14, 2004.