



industriales

etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Diseño de una metodología para la evaluación de proyectos sobre Redes Inteligentes en países en vías de desarrollo

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES

Autor: Andrea Morabito
Director: Francisco de Asís Ruz Vila



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Índice

1. Introducción	1
1.1. Estado del arte	3
1.2. Consideraciones adicionales	4
1.3. Redes Inteligentes en países en vías de desarrollo	5
1.4. Accesibilidad a la energía eléctrica	7
1.5. Objetivos perseguidos con el uso de Redes Inteligentes	9
1.6. Contexto energético países en vías de desarrollo	9
i. África sub-Sahariana	10
ii. India	11
iii. China	12
iv. Brasil	14
1.7. Condiciones necesarias para proyectos de Redes Inteligentes	15
1.8. Conclusiones de la introducción	16
2. Objetivo del estudio	17
2.1. Condiciones límites y directrices para evaluación	17
2.2. Definición del escenario	18
2.3. Adaptación del escenario a las diferentes condiciones locales	18
2.3.1. Aspectos económicos	20
i. Tasa de descuento	20
ii. Coste de la tecnología	21
iii. Calendario de ejecución	22
2.3.2. Aspectos sociales	23
2.3.3. Aspectos ambientales	23
2.3.4. Aspectos tecnológicos	24
i. Broadband over Power Line	25
ii. Supervisory Control and Data Acquisition	25
iii. Advanced Metering Infrastructure	25
iv. Demand Response	26
v. Distribution Automation	26
vi. Renewable Resource Forecast	27
vii. Smart Inverters	28
viii. Distributed Storage	28
ix. Microgrids	29
2.4. Análisis de sensibilidad	30

2.5.	<i>Análisis cualitativo</i>	31
3.	<i>Definición de la metodología propuesta</i>	32
3.1.	<i>Síntesis de la metodología</i>	32
3.2.	<i>Definición de beneficio</i>	33
3.3.	<i>Categorías de beneficios</i>	34
i.	<i>Económicos</i>	34
ii.	<i>Fiabilidad y calidad de potencia</i>	34
iii.	<i>Medioambientales</i>	34
iv.	<i>Seguridad y Estabilidad</i>	34
3.4.	<i>Beneficiarios</i>	34
3.5.	<i>Análisis coste beneficio</i>	35
	<i>Paso 1: Definición del proyecto</i>	35
	<i>Paso 2: Relacionar tecnologías con funciones</i>	37
	<i>Paso 3: Relacionar funciones con beneficios</i>	38
	<i>Paso 4: Monetizar/Rentabilizar beneficios</i>	39
	<i>Paso 5: Cuantificar costes</i>	44
	<i>Paso 6: Relacionar costes con beneficios</i>	44
	<i>Paso 7: Análisis de sensibilidad</i>	45
4.	<i>Smart Contract y Blockchain technology</i>	46
4.1.	<i>¿Qué son? ¿Cómo funcionan?</i>	46
4.2.	<i>Categorías de Blockchain</i>	46
4.3.	<i>Smart Contract</i>	47
4.4.	<i>Energy based blockchain</i>	48
i.	<i>Medidores inteligentes</i>	48
ii.	<i>Micro redes</i>	49
4.5.	<i>Smarter Energy Grid</i>	50
4.6.	<i>Problemas energéticos en los países en vías de desarrollo</i>	51
4.7.	<i>Seguridad y Fiabilidad</i>	52
4.8.	<i>Beneficios e impactos</i>	54
4.9.	<i>Beneficios económicos, ambientales e impactos sociales</i>	54
4.10.	<i>Blockchain y Smart Contract en el CBA</i>	55
5.	<i>Conclusiones y trabajos futuros</i>	57
	<i>Anexo I</i>	58
	<i>Ghana Case Study: Demand Response</i>	58
	<i>Referencias</i>	65

Listado de abreviaturas

IEA: International Energy Agency

WEO: World Energy Outlook

EPRI: Electric Power Research Institute

JRC: Joint Research Center

EC: European Commission

RI: Redes Inteligentes

SG: Smart Grid

GD: Generación Distribuida

T&D: Transmisión y Distribución

FSI: Fragile State Index

O&M: Operación y Mantenimiento

EERR: Energías Renovables

HP: Horas Pico

DR: Demand Response

SP: Servicios Públicos

DA: Distributed Automation

AFLR: Automated Fault Location and Restoration

O&M: Operation and Maintenance

DRI: Distributed Resource Integration

SI: Smart Inverters

RRF: Renewable Resource Forecasting

NWP: Numerical Weather Prediction

VAR: Voltios Amperios Reactivos

DS: Distributed Storage

1. Introducción

En un mundo en el cual la energía juega un papel fundamental para el desarrollo humano, económico, social y cultural, las Redes Inteligentes, junto con la generación distribuida, resultan imprescindibles para un crecimiento correcto y eficaz.

En las últimas décadas, la creciente demanda energética mundial ha sido, y sigue siendo una temática de gran importancia desde varios puntos de vista. En relación con esto los países en vías de desarrollo representan una categoría muy delicada y considerable que merece una atención especial. Algunos países como India y China han conseguido la electrificación total en los últimos años gracias a grandes inversiones en la instalación tanto de sistemas tradicionales, para suplir la creciente demanda energética y controlar su variabilidad, como de sistemas basados en energías renovables para la electrificación de áreas lejanas de las fuentes de generación y difícil de alcanzar mediante el esquema energético tradicional. Hoy en día, a pesar de la gran movilización de estudiosos, académicos y profesionales en el sector, hay todavía más de mil millones de personas en el mundo que no logran el acceso a la energía eléctrica. El objetivo a nivel mundial es lo de garantizar una electrificación total y moderna para el año 2030. [1]

Análisis dirigidos por el *International Energy Agency* y contenidos en el *World Energy Outlook* del 2017 (WEO) revelan que desde el año 2000 hasta el 2012, 62 millones de personas cada año ha conseguido el acceso a la energía eléctrica y, además, desde el año 2012 se observa un aumento hasta más de 100 millones de personas cada año. En todo este marco temporal casi todos los que han logrado la conexión lo hicieron gracias a la instalación de nuevas redes, muchas de las cuales generan energía a partir de combustibles fósiles. A pesar de esto, en los últimos cinco años es notable una tendencia creciente en la investigación y en la instalación de tecnologías renovables (en adelante EERR), que en los países en vías de desarrollo encuentran aplicaciones interesantes en forma de microrredes. Esta propensión hacía un sistema energético sostenible, mediante el aprovechamiento de fuentes renovables en microrredes, propone una posible línea de actuación para lograr el desafío propuesto en el WEO: el *Energy for all 2030*.

En solucionar el problema energético en los países en vías de desarrollo la aplicación de las últimas tecnologías resulta de gran interés desde múltiples puntos de vista. La variabilidad y la intermitencia de las fuentes renovables, por ejemplo, pueden ser mitigadas por medio de los últimos avances en el ámbito de la electrónica e informática energética. Las mencionadas Redes Inteligentes, que utilizan sistemas avanzados de comunicación y de control tanto en la fase de generación y transmisión como en la fase de distribución, si integrados con las tecnologías distribuidas pueden representar una

solución moderna y eficaz para la resolución de los principales problemas energéticos de los países en vías de desarrollo. El papel de las *Smart Grids* (SG), por lo tanto, es muy relevante para el cumplimiento del objetivo de acuerdo con la visión energética moderna. Las *Smart Grids*, o Redes Inteligentes, emplean dispositivos electrónicos para controlar y manejar en tiempo real de manera razonable los flujos de energía, introduciendo importantes mejoras en el sistema. Mediante los sistemas de Redes Inteligentes es posible no solo mejorar los parámetros de fiabilidad y de calidad sino también limitar las pérdidas en las distintas etapas del suministro energético. La *Smart Grid* es la tecnología más avanzada en la generación, transmisión y distribución de potencia. La eficiencia de las microrredes dotadas de sistemas inteligentes y la escasez de infraestructuras eléctricas con respecto a los puntos de consumo origina una prevalencia de estas con respecto a los sistemas de suministro energético tradicional. El objetivo de esta tecnología es de conectar varias micro redes para establecer una red robusta. [2]

A nivel mundial hay algunos países considerados en vías de desarrollo que planean la posibilidad de la instalación dispositivos inteligentes para mejorar su contexto energético. Emplear estas tecnologías define una mutación importante en múltiples ámbitos de la vida cotidiana colectiva. Gracias a sistemas de Redes Inteligentes, los problemas colaterales que influyen no solo directamente en la vida de los habitantes de países en vías de desarrollo sino también en la vida de la colectividad, son mayormente controlables y reducibles. El impacto de las Redes Inteligentes afecta toda la comunidad en varios aspectos no necesariamente técnicos. La sensibilización a los problemas ambientales, el uso de incentivos para la instalación de sistemas de SG, el aporte de estas tecnologías a la mejora de la calidad de vida son algunos de los criterios que motivan efectos en los ámbitos social, cultural y económico del país considerado.

Para que el proyecto tenga éxito, es necesario adaptar las características propias del plan a las exigencias de los diferentes *stakeholders*. Además, es necesario examinar la voluntad de ellos a la instalación de un sistema inteligente que prevé costes y beneficios diferentes con relación a las tecnologías empleadas y por tanto a las funciones dedicadas. Por ejemplo, una determinada técnica o tecnología puede llevar a ahorros importantes para los usuarios y a costes elevados para las empresas de servicios públicos y viceversa. Un sistema realmente eficiente tendrá que tener un éxito duradero que garantice beneficios e impactos a lo largo del tiempo y que estén relacionados con las funciones consideradas relativas a las Redes Inteligentes en países en vías de desarrollo.

El éxito del proyecto depende, además, de la participación de los diferentes *stakeholders* tanto al desarrollo como al mantenimiento de la red. Crear comunidades de usuarios con relaciones fiduciarias

incrementa la posibilidad que el proyecto tenga un resultado positivo en el tiempo. Para conseguir este objetivo nos ayudan las últimas tecnologías de informática y electrónica, *Blockchain* y *Smart Contract*. Estas se pueden aplicar al contexto de las Redes Inteligentes para crear una “red más inteligente” que mejore los conceptos de seguridad y fiabilidad introduciendo muchos beneficios e impactos para todos los participantes.

En la evaluación de dichos sistemas se consideran múltiples aspectos que influyen la decisión final respecto a la implementabilidad real del proyecto. Normalmente existen metodologías de evaluación para sistemas de red inteligente que no consideran las condiciones particulares de los países en vías de desarrollo. El estudio propone de proporcionar una metodología que considere los aspectos peculiares de las *Smart Grids* en países en vías de desarrollo, teniendo en cuenta los diferentes objetivos e indicadores que hay que valorar con distintas prioridades tanto en la fase de proyecto como en la fase de evaluación.

1.1. Estado del arte

La continua expansión de tecnologías de Redes Inteligentes coincide con la necesidad de definir metodologías para la evaluación de proyectos de este tipo. En los últimos años se llevaron a cabo muchos estudios que tienen como objetivo lo de definir una estrategia para determinar, de antemano, los costes y los beneficios que se obtienen en la instalación de dichos sistemas. Sin embargo, en la búsqueda de artículos relativos a este tema no se encontró una metodología precisa para los países en vía de desarrollo que, diferentemente de los países desarrollados, requieren objetivos e indicadores diferentes para una correcta evaluación. Se considera, principalmente, la metodología desarrollada por el *Electric Power Research Institute* (EPRI) en el 2010 en el estudio “*Methodological Approach for Estimating the Benefits and Costs of Smart Grid Demonstration Projects*”. A esta metodología se añade el *Guidebook for Cost/Benefit Analysis of Smart Grid Demonstration Projects*, desarrollada siempre por el EPRI en el 2011, que tiene actualizaciones técnicas respecto al documento anterior. La metodología EPRI proporciona una estructura para evaluar los beneficios económicos, medioambientales, de fiabilidad y de seguridad para todo los diferentes *stakeholders* (empresas de servicio público, clientes, sociedad). Antes de ésta no existía una metodología estructurada para el análisis costes-beneficios para proyectos de Redes Inteligentes. Sucesivamente, en el año 2012, el *Joint Research Center* (JRC) presentó el *Guidelines for conducting a cost-benefit analysis of Smart Grid Projects* con el objetivo de proponer una guía y unas recomendaciones para efectuar un análisis coste-beneficio de proyectos de Redes Inteligentes. La finalidad del estudio es particularizar la metodología EPRI al contexto europeo, en este caso, adaptando los factores determinantes e

incorporando análisis cualitativos en varios pasos del proyecto. En el desarrollo del trabajo resulta muy importante conocer el procedimiento EPRI y además tener en cuenta los ajustes aplicados en la adaptación del JRC. Se propone tener en cuenta las necesidades de los diferentes usuarios haciendo un sondeo de las reales posibilidades de instalación de Redes Inteligentes en el inmediato o en el futuro. Por tanto, es necesario hacer un estudio previo que contextualice las metodologías consideradas a países en vía de desarrollo, que incluya una perspectiva social, política y cultural de forma que se consideren diferentes *Key Performance Indicator* (KPI) y consecuentemente objetivos, elementos, tecnologías, funciones y beneficios alternativos.

1.2. Consideraciones adicionales

La pobreza energética, que representa una condición desfavorable para el desarrollo humano, es la circunstancia determinante para el desarrollo del estudio. No poder acceder a la red eléctrica comporta el uso de combustibles fósiles para el generar luz y calor. Este uso es responsable de 2,8 millones de muertes prematuras en el mundo [1]. Las Redes Inteligentes proporcionan el modelo para una mejor generación, transmisión y distribución de potencia. Son más fácilmente instalables en áreas con carencia de infraestructuras eléctricas gracias a su versatilidad, pueden trabajar a nivel de micro redes para pequeñas comunidades o bien se pueden conectar muchas micro-redes entre ellas generando una macro-red. La agregación de *Blockchain technology* y *Smart Contract* incrementa aún más el nivel de interoperabilidad de los usuarios incrementando su función de productor/consumidor con la función de supervisor de las operaciones que se están produciendo en el entorno considerado.

El aspecto que se quiere enfocar de manera especial para tener un panorama lo más completo posible, es el papel que juegan todas las partes interesadas en la instalación de las tecnologías.

Dichas partes se identifican en cinco grupos: los diseñadores, los constructores, las compañías eléctricas, los usuarios y los gobiernos.

- Los diseñadores tienen como misión, diseñar el sistema de manera eficaz para el contexto considerado, teniendo en cuenta factores económicos, de rendimiento y fiabilidad de la red, de integración de EERR y otros más. El diseñador debe tener una visión general del contexto para diseñar un sistema adecuado.
- Los constructores evalúan la factibilidad del proyecto. El uso de fuentes renovables para la generación de electricidad implica la evaluación de factores ambientales para un correcto funcionamiento de la tecnología considerada. El constructor es el responsable de la

construcción de la red y debe tener en cuenta los eventuales problemas y tomar la decisión correcta para solucionarlos.

- Las compañías eléctricas contribuyen integrando las tecnologías inteligentes en su red eléctrica existente. Este proceso incluye la modernización de la red mediante la instalación de elementos tecnológicos *Smart* en lugar de los tradicionales, la incorporación de EERR y de la generación distribuida, y la capacidad de utilizar el control en la distribución para manejar los flujos de potencia y prevenir el elevado estrés de la red en las horas pico de consumo.
- Los usuarios involucrados en un sistema de Red Inteligente deben ser “activos” compartiendo informaciones en tiempo real con los demás sistemas de la red. La excesiva demanda en las horas pico puede causar problemas de fiabilidad y el uso de tecnologías de respaldo altamente contaminantes. La introducción de elementos de control para los usuarios, como lo *Smart Meter*, permite el “desplazamiento de cargas” durante las horas valle determinando un sistema más eficiente y fiable. Además, la agregación de los *Smart Contract* puede reglamentar de manera eficaz los consumos en las HP y todos los eventos relativos al suministro energético por medio de acuerdos inmodificables.
- Los gobiernos deben proporcionar incentivos económicos para la instalación de la tecnología y, además, soportar normativamente el desarrollo de estos sistemas. A nivel mundial hay países como China, India y Brasil que han invertido mucho en el desarrollo de tecnologías de Redes Inteligentes. [2]

1.3. Redes Inteligentes en países en vías de desarrollo

Generalmente, los beneficios principales de las Redes Inteligentes se evalúan en términos de emisiones de contaminantes y eficiencia energética. Sin embargo, hay otros factores que además son parte de las ventajas de las RI como la estabilidad, la seguridad y el crecimiento económico.

La estructura tradicional de la red eléctrica debe modificarse tanto para permitir el flujo de potencia y de datos en los dos sentidos como para la adición de tecnologías renovables. Para poder instalar las RI hay que cumplir algunos requisitos que comportan la mejora infraestructural y el uso de elementos como los *Smart Meters*. Estos por ejemplo son dispositivos de primaria importancia para el desarrollo de un sistema de RI volviendo la red más flexible y más manejable.

Hoy en día la tecnología de RI es un objetivo importante para los países en vías de desarrollo. Un estudio del *Center for Study of Science Technology* en India ha propuesto 4 factores que hay que tener en cuenta para el progreso de estos sistemas en países en vías de desarrollo. En el mundo hay países

como China, India y Brasil que se destacan de las demás realidades de países en vías de desarrollo habiendo invertido mucho dinero en la investigación y en el diseño de sistemas de Redes Inteligentes.

Los factores considerados en el estudio son:

- **Calidad y fiabilidad:** donde la calidad de la conexión a la red es muy baja hay disponibilidad intermitente de energía. Las RI balanceando la demanda y la distribución pueden garantizar la continuidad de suministro.
- **Construir una RI en lugar de un sistema tradicional:** En algunos países en vías de desarrollo como Tanzania la red eléctrica no está totalmente hecha y la casi totalidad de las personas no tiene acceso a la electricidad. En este caso y en casos similares puede ser mejor empezar con sistemas de RI en lugar de sistemas tradicionales.
- **Rentabilidad inversiones:** el aumento de la demanda energética en países como China necesita una inversión rentable que se puede amortiguar con la adición de usuarios.
- **Incorporación de EERR a la RI:** se añaden sistemas de generación distribuida con EERR que manejan eficazmente los problemas debidos a la intermitencia de las fuentes.

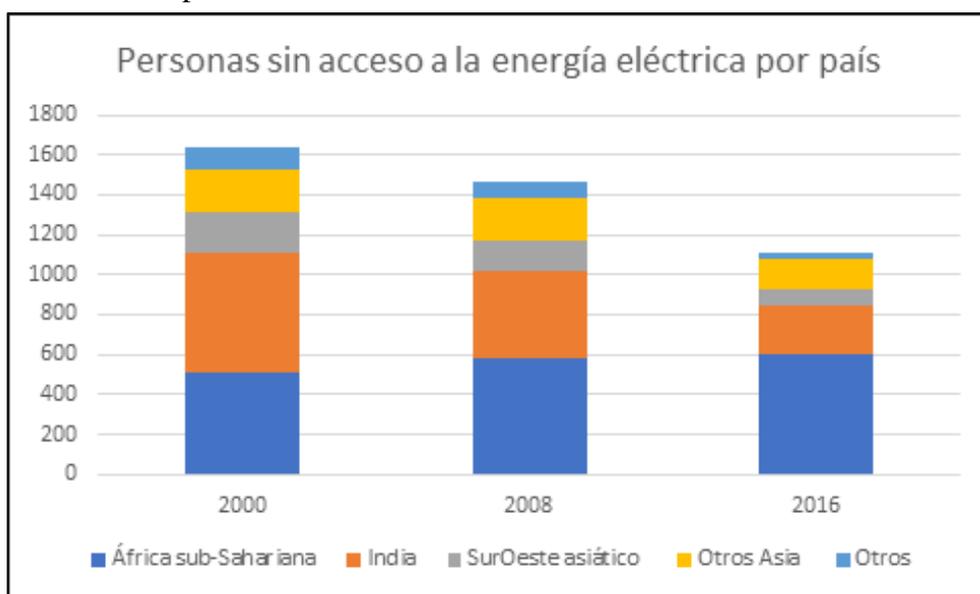


Figura 1: personas sin acceso a la energía eléctrica por país. Acumulado.

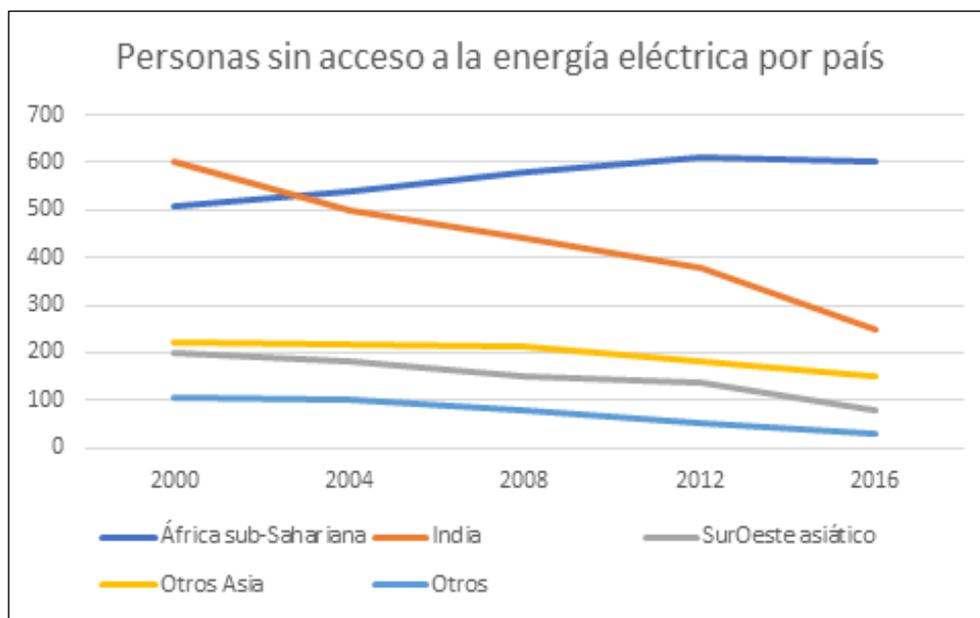


Figura 2: personas sin acceso a la energía eléctrica por país.

De las gráficas podemos apreciar la evolución en el tiempo del número de personas en el mundo sin acceso a la electricidad. Es notable la disminución de personas sin acceso a la electricidad en India, que ha conseguido la electrificación de la mayoría del país en los últimos años.

1.4. Accesibilidad a la energía eléctrica

Uno de los problemas más relevantes para lograr el objetivo de la electrificación total en los países en vías de desarrollo es la accesibilidad a la energía eléctrica. A pesar de los progresos alcanzados en el acceso a la energía a lo largo de los últimos 18 años, el 14% de la población mundial no tiene acceso a la electricidad y el 84% de estos vive en áreas rurales. En la Tabla 1 podemos apreciar el acceso a la electricidad en los países considerados y los porcentajes relativos a las áreas rurales y urbanas. La diversidad de la tipología de la instalación depende de la ubicación de los usuarios y de las condiciones físicas y meteorológicas. A la hora de evaluar la solución más viable para la electrificación de una zona donde hay escasez de conexión eléctrica, por tanto, es necesario considerar todas las soluciones posibles de conexión para adoptar la que más se ajusta tanto a la necesidad de los diferentes *stakeholders*, como a los contextos en los cuales hay que efectuar el proyecto.

En este sentido se consideran las tres diferentes configuraciones existentes para lograr la conexión a la red y, por lo tanto, para solucionar el problema del acceso a la electricidad.

Las tres opciones son: *on-grid*, *mini-grids*, *off-grid*.

- 1. Sistemas *on-grid*:** la electricidad es proporcionada gracias a una conexión, o una extensión, de la red local que está conectada a la red de transmisión. Generalmente la producción de

electricidad es demandada a grandes generadores centralizados, y puede ser incrementada mediante la implementación de generación distribuida conectada a la red de baja tensión. La proximidad de los usuarios con respecto a la red de distribución determina la viabilidad de la solución propuesta. Para adoptar esta configuración es necesario o que existan las infraestructuras de generación y transporte de la electricidad, o que los costes para la edificación de las infraestructuras necesarias sean rentables (por ejemplo, para áreas con elevada densidad de demanda).

2. **Sistemas *mini o micro-grid*:** son redes de tamaño reducido que se instalan en sitios donde no hay presencia de la red principal. Estos sistemas no suelen tener infraestructuras para la transmisión de la energía siendo constituidos solo de las etapas de generación y distribución. Normalmente las mini-redes están formadas por tecnologías de generación como fotovoltaica, mini-eólica o minihidráulica, un sistema de respaldo que puede ser un conjunto de baterías y/o un generador diésel y una red de distribución de baja tensión. La potencia instalada en una mini-red varía desde los 10-20 kW hasta pocos MW. La potencia es fácilmente incrementable por la instalación de paneles fotovoltaicos adicionales u otros dispositivos usados para la generación. Esta configuración se adapta óptimamente con los sistemas de control de las RI permitiendo una eficiencia excelente de todos los dispositivos de la red.
3. **Sistemas *off-grid*:** representan una tipología de instalación no conectada a la red. Estos sistemas aislados son utilizados, generalmente, para el abastecimiento energético de viviendas individuales. Son constituidas, principalmente, por instalaciones fotovoltaicas respaldadas con sistemas de baterías para el almacenamiento energético. Esta configuración se emplea en sitios donde no hay posibilidad de conexión a red, donde la demanda energética y la densidad de usuarios es muy baja y no es rentable la construcción eventuales infraestructuras.

Dependiendo de las características físicas del entorno y de la necesidad de los *stakeholders* se puede elegir cuál de las tres vías encarna la solución mejor.

País	Acceso a la electricidad (% de la población)	Acceso a la electricidad (% población rural)	Acceso a la electricidad (% población urbana)
África sub-Sahariana	42.8	24.7	76.0
Brasil	100	100	100
India	84.5	77.6	98.4
Asia del sur	85.6	79.4	98.1
América latina	97.8	94.4	99.5

Tabla 1: Acceso a la electricidad por país o región 2017. Fuente: worldbank.org

1.5. Objetivos perseguidos con el uso de Redes Inteligentes

Uno de los objetivos de las RI es la instalación de dispositivos que, según el caso estudiado, aporten mejoras en las varias etapas del camino energético actuando en conjunto con la generación distribuida y teniendo en cuenta las seis componentes del mercado de la energía eléctrica: fuente, generación, transporte, distribución, servicios y almacenamiento.

Los dispositivos inteligentes desempeñan funciones determinadas con relación a las necesidades del proyecto. Para sistemas *on-grid*, por ejemplo, se pueden emplear elementos que reduzcan las pérdidas en las largas transmisiones de alta tensión, mientras en el caso de sistemas de *mini-grids*, se adoptarán tecnologías para el control y la comunicación en la red de distribución con la finalidad de optimizar el consumo energético de los usuarios.

Por lo tanto, una instalación de sistemas inteligentes tiene que verificar la voluntad de los diferentes *stakeholders* y al mismo tiempo satisfacer sus exigencias. Las empresas de Servicios Públicos, por ejemplo, tendrán exigencias diferentes con respecto al usuario final. Los objetivos de un sistema inteligente, por lo tanto, no son de identificar solo en las mejoras tecnológicas sino también en las mejoras relativas a la calidad de la vida, al medioambiente y a todos los posibles beneficios relacionados.

1.6. Contexto energético países en vías de desarrollo

Como se evidencia en el informe WEO 2017 de IEA hay más de mil millones de personas en el mundo que no tienen acceso a la electricidad. De estos casi 600 millones viven en el África Sub-Sahariana y los demás en India y en otros países subdesarrollados del suroeste asiático. Seguramente las exigencias de los diferentes países comportan diferentes decisiones a la hora de elegir el diseño, los elementos y todas las peculiaridades de un sistema de RI. Por lo tanto, hay que acentuar *a priori* las diferencias entre las regiones en vías de desarrollo como la África sub-Sahariana, de países ya en parte desarrollados como India.

Antes de poder proceder a la definición de una metodología para la evaluación de SG en países en vías de desarrollo es necesario hacer un enfoque sobre la condición del sistema energético en el país o región considerada. Conocer el estado infraestructural, el presente y el futuro mix energético del área considerada, la ubicación de los usuarios (áreas urbanas o rurales), son algunos de los elementos que nos ayudan en efectuar evaluaciones más eficaces al momento de definir los elementos, las funciones y los beneficios del sistema de RI. A la luz de las diferencias apreciadas anteriormente se

realizan dos diferentes enfoques: uno para la región del África Sub-Sahariana y el otro para países ya en fase avanzada de desarrollo como India, China y Brasil.

i. África sub-Sahariana

En la África sub-Sahariana durante los últimos 5 años el porcentaje de personas conectadas a la red eléctrica ha ido subiendo de manera considerable. A pesar del incremento, los esfuerzos considerados no van al compás con el crecimiento de población. De hecho, se prevé que, en el año 2030, 600 de los 674 millones de personas que no tendrán aún acceso a la energía eléctrica vivirá en el África sub-Sahariana. [1] La potencia total instalada en el África sub-Sahariana en el 2016 era de 122GW. En las figuras 3 y 4 se observa el mix energético en 2016 y el previsto para el 2030 para una potencia instalada también prevista de 253 GW.

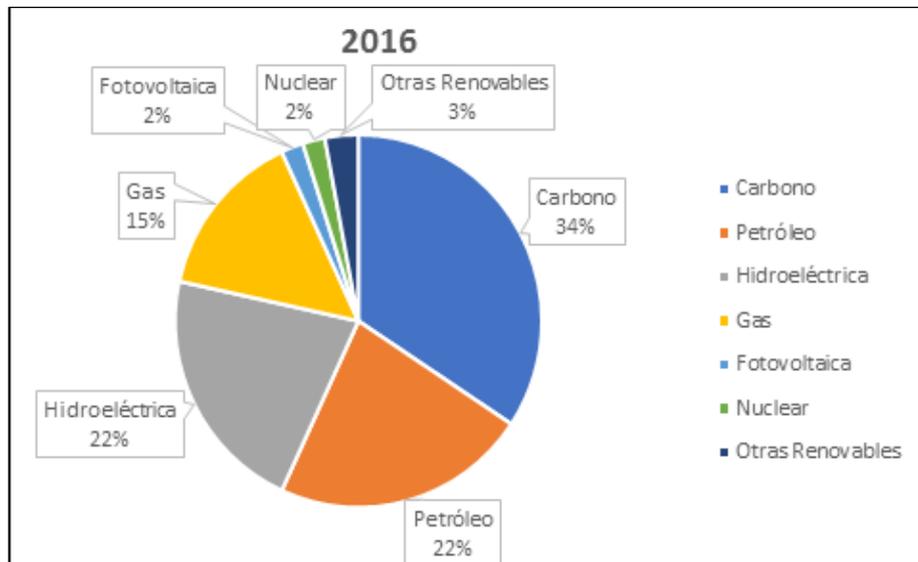


Figura 3: mix energético África sub-Sahariana 2016

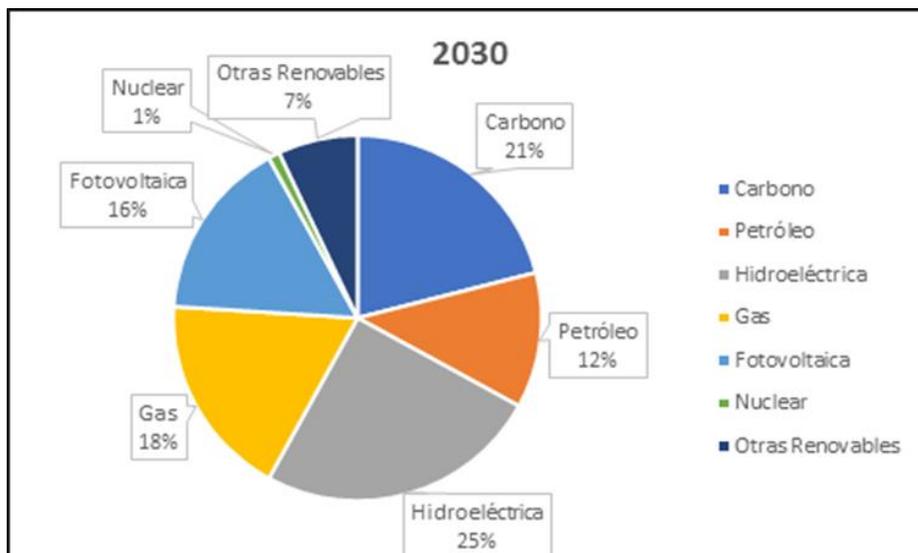


Figura 4: mix energético África sub-Sahariana 2030

En la gráfica se puede apreciar como la energía hidroeléctrica abarcará la parte más grande de la capacidad total y como la energía solar fotovoltaica aumentará su porcentaje hasta sobrepasar el petróleo. El uso de recursos renovables será siempre más importante en el panorama energético africano y, por tanto, la generación distribuida puede considerarse imprescindible para optimizar la eficiencia del sistema. Además, una visión más moderna no puede prescindir de los sistemas de RI que siempre van adaptados al contexto considerado.

Es cierto que según el panorama tecnológico y las necesidades requeridas hay soluciones *Smart* específicas que pueden contribuir a la reducción de costes, crecida económica, éxito en la sostenibilidad. Por eso, hay que marcar diferencias sustanciales entre los varios países en vías de desarrollo según su estado propio de progreso.

ii. India

La India es uno de los países con más crecimiento económico en el panorama mundial. El sector energético indiano, al compás de la crecida económica, está evolucionando muy rápidamente. En los últimos años se consiguió un aumento notable de la electrificación del país que está llevando la India hacia la electrificación total. El sector energético es lo que está mutando más rápidamente y se está adaptando a esta época con un sistema moderno y puesto al día. Hoy en día la capacidad total instalada en India es de 344 GW y su mix energético se detalla en la Figura 5: Como podemos ver del gráfico se aprecia una contribución dominante del carbón como fuente primaria de producción de electricidad. En un escenario futuro el cambio más significativo será relativo a las renovables, sobre todo la energía solar fotovoltaica. El consumo de energía en India crece del 4,2% cada año y es el

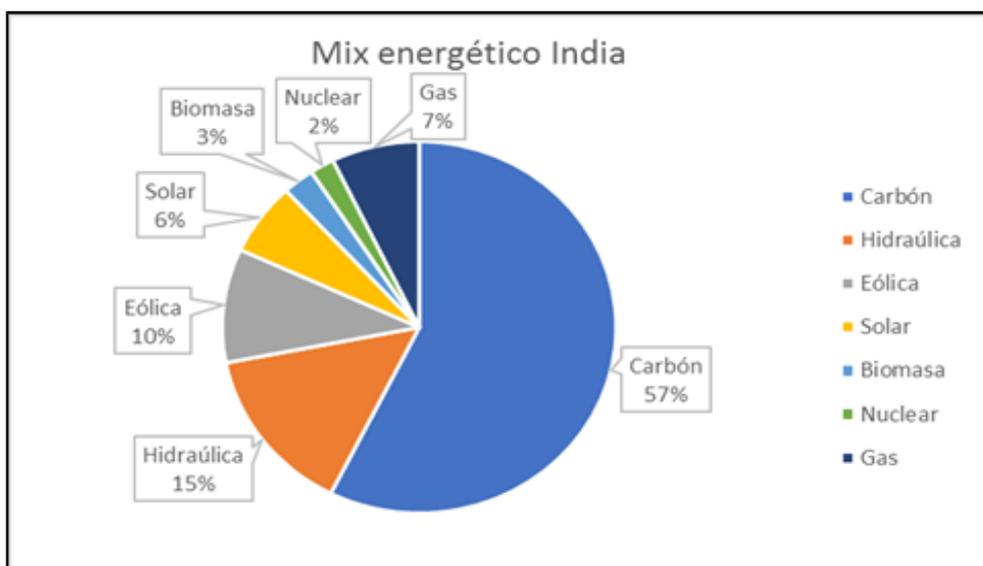


Figura 5: Mix energético India 31/05/2018; Fuente: Government of India

más rápido del mundo. Dentro del año 2020 India superará China como mayor mercado energético mundial y llevará las renovables como segunda fuente de generación.

A pesar de dichos avances, el mix energético Indiano cambia muy lentamente y se prevé que aún en el año 2040 el 50% de la electricidad seguirá siendo generada por centrales de carbón. [4] Además, la India es uno de los países que tiene ya un plan detallado para el desarrollo de Smart Grid en los próximos años. Desde el año 2013 se empezaron a adoptar iniciativas como “*Smart Grid Vision and Roadmap for India*” y “*National Smart Grid Mission*” para que el fenómeno de desarrollo de sistemas inteligentes sea gradualmente impactante tanto a nivel tecnológico como a nivel social y económico. Las razones para la instalación de sistemas de RI son similares en todos los países en vías de desarrollo independientemente de su nivel de avance tecnológico. Por supuesto hay condiciones que se adaptan más a las exigencias de algunos países con respecto a otros y estas varían las funciones que hay que satisfacer.

Hay varios motivos para la necesidad de una SG en India. Se destaca como uno de los problemas principales el robo de energía, debido a una falta de protección de la red y a un elevado índice de pobreza. Luego, son muy relevantes las pérdidas relativas a las etapas de T&D se evalúan alrededor del 23% de toda la producción de energía. [3]

El uso de tecnologías inteligentes permite una relevante mitigación de los problemas evidenciados y puede considerarse una solución eficaz.

iii. China

La China es una de las economías de los países en vías de desarrollo que está creciendo más rápidamente. Desde el punto de vista energético, ha logrado la electrificación total en el año 2015 y desde el año 2007 hasta el año 2050 tiene previsto un incremento del 233% en la demanda. En la última década en China se ha asistido a un aumento relevante en la demanda energética que ha llevado el país a un nivel muy elevado de contaminación debido al largo uso de centrales de carbón. En los últimos años estamos asistiendo a un cambio evidente del paradigma energético chino gracias a grandes inversiones en las EERR. La energía solar fotovoltaica y la energía eólica están reemplazando en manera gradual las fuentes tradicionales llevando la China a ser un país pionero en el mundo de las renovables. A pesar de estas consideraciones, hoy en día en China tenemos una capacidad instalada de 1625 GW con una fuerte dependencia del carbón. Se prevé que la capacidad instalada crezca hasta 3188 GW dentro del año 2040. Hoy en día, el mix energético del país es el que se muestra en la Figura 6.

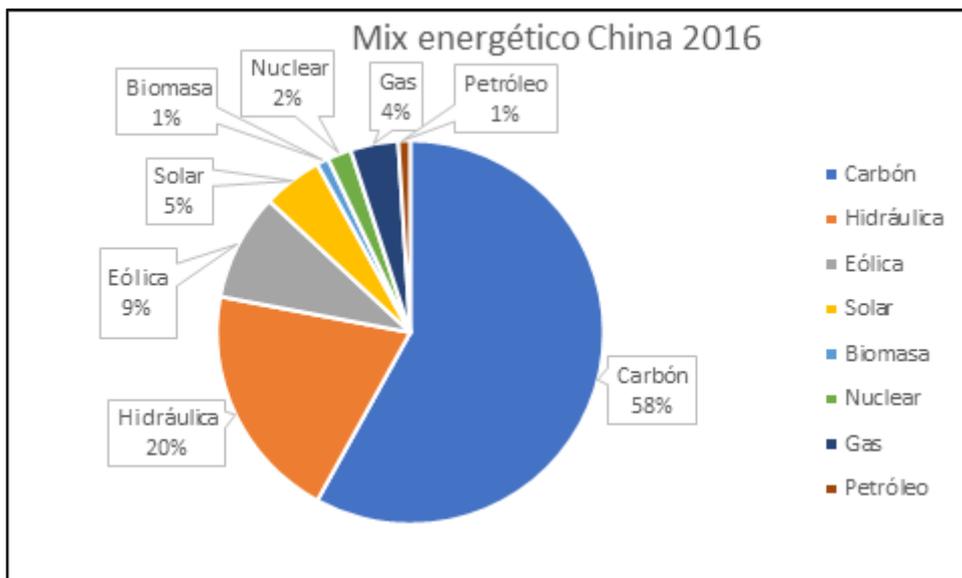


Figura 6: Mix energético China 2016; IEA WEO China

Podemos apreciar como el mix energético chino es muy similar al indio. Tenemos un predominio del carbón que es la fuente primaria de generación de electricidad para los dos países. Los dos países, pero son los más comprometidos en el cambio de modelo energético hacia un futuro más sostenible. Por lo tanto, el mix energético se prevé que variará de acuerdo con el *World Energy Outlook* del *International Energy Agency*. En el año 2040, pues, el escenario pronosticado será el siguiente:

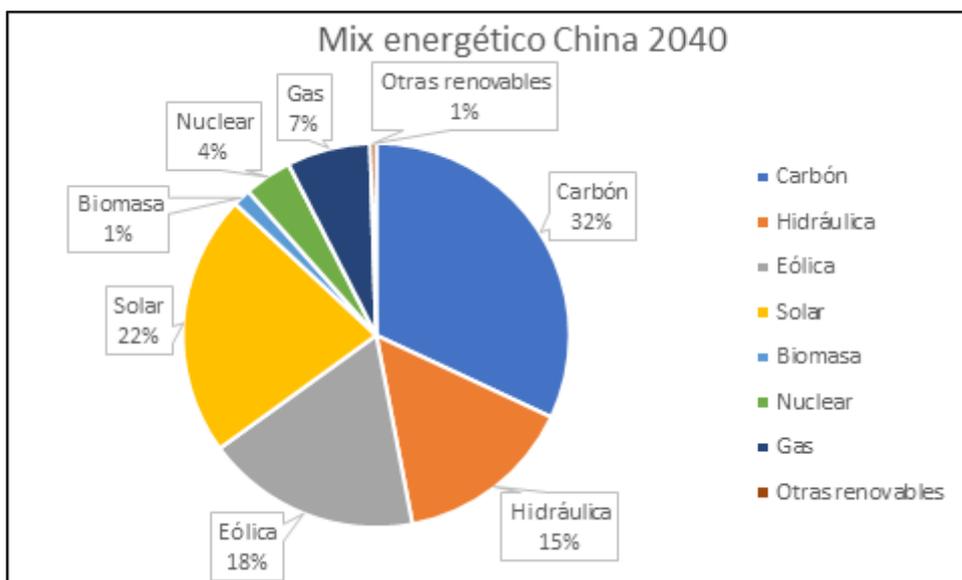


Figura 7: Mix energético China 2040; IEA WEO China

Se puede apreciar un aumento considerable de las EERR. En particular la energía solar fotovoltaica y la energía eólica tendrán los incrementos más importantes con respecto a las demás tecnologías de generación renovables. Este cambio en el panorama energético chino favorece el sistema de generación distribuida y, por tanto, la instalación de Redes Inteligentes de acuerdo con los planes de desarrollo del gobierno chino. El plan del gobierno es lo de conseguir la instalación de una *Smart Grid* nacional que mejore tanto los ámbitos social y cultural como el ámbito económico.

iv. Brasil

El Brasil es el quinto país más grande del mundo con una población de más de 200 millones de personas, el décimo consumidor de energía en el mundo con 150 GW de capacidad instalada y el mayor en Latinoamérica. Como se puede apreciar en el gráfico en la figura 8, en Brasil el 65% de toda la energía utilizada procede de plantas hidráulicas y solo el 16% por otras fuentes renovables.

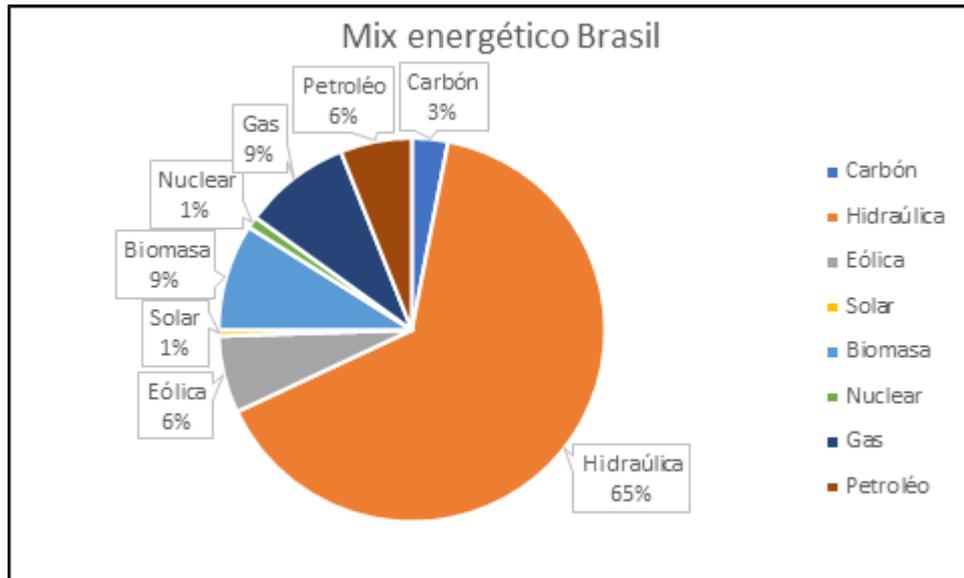


Figura 8: Mix energética Brasil

Para el año 2040 se prevé que se triplique la capacidad eólica, solar y de biocombustibles, e incremente de un tercio la energía hidráulica. El Brasil es el segundo país mundial en el uso de biocombustibles. Se espera, de hecho, que dentro del año 2040 el 24% de todo el combustible líquido consumido en Brasil sea biocombustible siendo hoy en día el 15%. En el mix energético, a pesar de que la demanda crezca del 19%, el petróleo bajará desde el 6% al 3% mientras el gas casi doblará su índice desde el 9% hasta el 16%. El uso del gas es justificado como fuente de respaldo a la crecida de las renovables. Este recurso permite flexibilidad en la producción de energía asegurando el suministro en las horas en las cuales las fuentes renovables, por su intermitencia, no pueden garantizarlo. Diferentemente de los demás países, en Brasil es notable una predominancia de la energía hidráulica como fuente primaria de generación el gas natural es el segundo por importancia, aunque representa solo el 10% del total de la capacidad instalada mientras las renovables no llegan ni al 20%. El Brasil se está centrando en la producción de energía para suplir la demanda futura mediante centrales hidráulicas por el 50%, por energía eólica el 30% y el 20% por gas y otros recursos. El Brasil puede ser el mejor mercado para la instalación de sistemas de Redes Inteligentes. En los últimos 5 años Siemens ya invirtió mil millones de dólares en el mercado de las Redes Inteligentes brasileñas y se han ejecutado numerosos proyectos piloto como el Parintins Project u el Fernando de Noronha Project [2]

1.7. Condiciones necesarias para proyectos de Redes Inteligentes

Para un desarrollo eficaz de cualquier proyecto de RI es importante hacer una estimación de los factores sociales y tecnológicos necesarios. La evaluación incluye los aspectos relativos a la condición política local, a los aspectos organizativos, a las tecnologías y al capital humano. En los países en vías de desarrollo estas condiciones son acentuadas con respecto a los países desarrollados y, además, entre los países en vías de desarrollo las circunstancias evidenciadas difieren mucho en función de las características propias del país considerado. Por esta razón, a continuación, se proponen las 5 diferentes peculiaridades que influyen fuertemente en el éxito de un proyecto de RI. Además, se propone, para cada de estas, un análisis relativa a la África sub-Sahariana que exponga una visión general de las iniciativas necesarias para una aplicación eficaz de RI en dicha parte del mundo.

- **Políticas inteligentes:** el marco normativo es uno de los aspectos fundamentales para un buen desarrollo. En este ámbito se incluyen simplificaciones y apoyos para la electrificación rural, la integración de renovables y de generación distribuida, la recuperación de costes para las empresas de servicios públicos. En el contexto del **África sub-Sahariana** el ajuste de estas legislaciones según las prioridades. Las nuevas políticas tienen que priorizar el acceso a la energía para los pobres respondiendo al rápido crecimiento de la demanda, permitiendo más flexibilidad en el servicio invirtiendo en la expansión y en la integración de sistemas *off-grid* y *mini-grid*. [7]
- **Planificación inteligente:** es importante ajustar la red a las condiciones existentes intentando asegurar una interoperabilidad entre las redes tradicionales y las nuevas. En el **África sub-Sahariana** hay que buscar un equilibrio entre la integración de la red regional, las mejoras en la red nacional y la descentralización de las *mini-grid*. La integración de estas *mini-grid* con las redes nacionales y regionales encarna la solución ideal para el éxito de las SG. [7]
- **Sistemas y operaciones inteligentes:** garantizar la seguridad y la calidad de suministro mediante la integración de sistemas de control inteligente de la carga y mediante integración de fuentes de generación distribuida. Para el **África sub-Sahariana** los estándares han que ser menos estrictos considerando que las interrupciones de suministro, por ejemplo, son “normales” en dichos países. [7]
- **Tecnologías inteligentes:** se trata de implementar tecnologías ya maduras optimizando la interoperabilidad con las existentes y desarrollar soluciones futuras para satisfacer las necesidades de electrificación. La diversidad de las necesidades y de los objetivos en los diversos países del **África sub-Sahariana** varía las tecnologías para utilizar. En esta etapa se considera muy importante la verificación de la factibilidad a través proyectos piloto. [7]

- **Personas inteligentes:** es importante “entrenar” los diferentes *stakeholders* para facilitar la transición a las Redes Inteligentes, atrayendo mediante incentivos e involucrando activamente los usuarios mediante la formación de asociaciones. En el **África sub-Sahariana** resulta esencial educar los usuarios sobre la electricidad para que se puedan mover hacia las RI de manera natural. Es necesario prestar una atención particular a la captación de las comunidades *off-grid* de manera que ellos mismos puedan administrar y mantener el sistema de manera sostenible. [7]

1.8. Conclusiones de la introducción

La instalación de sistemas de RI en países en vías de desarrollo lleva muchos años y sigue siendo un tema actual con un importante impacto futuro. A la luz de las consideraciones hechas, podemos considerar Brasil, India y China como países pioneros para proyectos de *SG* entre los países “subdesarrollados”. El modelo que estos países tiene que seguir para el éxito de un proyecto de *SG* considera algunos puntos fundamentales. Primero hay que entender la importancia de la instalación de este sistema y las necesidades para los diferentes usuarios y para su futuro. Luego es necesario tener un fuerte apoyo gubernamental mediante incentivos económicos para los usuarios tanto en la instalación como en la manutención y en el coste de los elementos. Hay que implementar también el número de proyectos piloto para que la instalación de las tecnologías de *SG* sea más eficaz en futuro y mejore la calidad de la energía. Otro paso fundamental es la integración en el sistema de tecnologías renovables en una visión de generación distribuida. El avance hacia una red inteligente va a la par con estas condiciones y es una etapa imprescindible para un éxito real del proyecto. Y finalmente hay que tener en cuenta el cambio infraestructural necesario para la instalación de los elementos de Redes Inteligentes, en los países que ya tienen una infraestructura eléctrica tradicional, y la construcción *ex novo* de equipos necesarios para la explotación de la tecnología. En una visión futura los sistemas de Redes Inteligentes estarán incrementados por las tecnologías de *Smart Contract* y *Blockchain*. Hoy en día no se pueden cuantificar exactamente los beneficios y los costes que introducen las dos tecnologías mencionadas, pero ya se pueden presumir impactos importantes sobre el mercado energético y sobre los diferentes participantes. La integración es demandada a todos los diferentes *stakeholders* y los países en vías de desarrollo, que se destacan por tener una estructura energética débil pueden desarrollar por primeros la aplicación de las tecnologías citadas y ser precursores también en este ámbito.

2. Objetivo del estudio

El objetivo del estudio es proporcionar una guía para definir una metodología para la evaluación de instalaciones de Redes Inteligentes en países en vías de desarrollo. Se propone adaptar una metodología por pasos desarrollada por el *Electric Power Research Institute* (EPRI) a las condiciones de los países en vías de desarrollo. La metodología se basa en un conjunto de directrices que se adaptan a las condiciones locales para identificar y monetizar los costes, los beneficios y analizar críticamente todas las variables. Se plantea, además, una evaluación cualitativa de dichos sistemas que considere también el aspecto sociocultural relativo a la implementación de dicha tecnología en países en vías de desarrollo. El argumento del estudio y más precisamente las directrices estimadas, se pueden considerar como un conjunto de propuestas importantes que hay que tener en cuenta al momento de efectuar el análisis. Esto no pretende dar indicaciones inalterables para todos los posibles escenarios que, como dicho anteriormente, son muy diferentes y requieren un estudio puntual de las condiciones locales de parte de los responsables del proyecto, de su desarrollo y del proceso de toma de decisiones. El estudio propone una metodología por pasos que incluya las condiciones más comunes a los países en vías de desarrollo y que al mismo tiempo sea flexible y adaptable a las diferentes necesidades de las realidades en los países en vías de desarrollo.

2.1. Condiciones límites y directrices para evaluación

Al plantear las directrices para el análisis, es necesario previamente tener en cuenta algunos factores propios de la tecnología y de su ubicación. Antes de pasar a la verdadera metodología hay que definir por pasos las fases necesarias para el desarrollo del sistema SG. Por lo tanto, recurrimos a los pasos descritos en [5] con algunas medidas adaptadas al contexto de los países en vías de desarrollo. [2]

1. Definición del escenario
2. Adaptación del escenario a las diferentes condiciones locales
3. Aplicación metodología
4. Análisis de sensibilidad para analizar como la productividad es afectada por las diferentes variables (paso 2)
5. Integración de un análisis cualitativo con la metodología

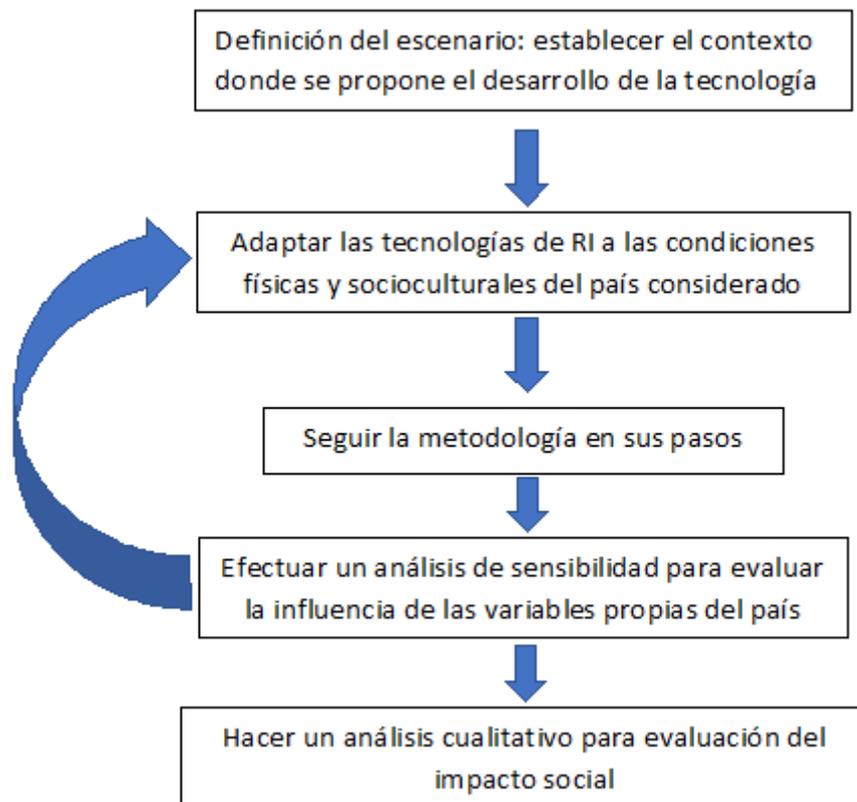


Figura 9: Pasos para evaluación

Una vez determinadas las directrices vamos a describir algunos aspectos para entender más en detalle las consideraciones evidenciadas.

2.2. Definición del escenario

Como primer paso es importante definir el contexto en el cual se propone la instalación. Como hemos previamente comentado, dependiendo del país considerado, las instalaciones de sistemas inteligentes varían según las necesidades. Es necesario, por tanto, establecer el porcentaje de los medidores inteligentes a instalar, el tiempo de instalación y las funcionalidades consideradas. Estos parámetros, por ejemplo, son funciones de muchas otras variables como las diferentes tipologías de usuarios y la ubicación de las instalaciones.

2.3. Adaptación del escenario a las diferentes condiciones locales

Las diferentes condiciones locales, tanto físicas como sociales, determinan variaciones en la instalación de sistemas inteligentes. Los impactos y por tanto los beneficios dependen directamente de las observaciones hechas y por eso es necesario hacer un análisis profundo del entorno.

La aplicación de RI en países en vías de desarrollo está enfocada de manera diferente respecto a los países desarrollados. Por ejemplo, en países como China e India el desarrollo está más centrado en la modernización de las infraestructuras para reemplazar los métodos de generación más contaminantes que, como hemos previamente evidenciado, son predominantes en el mix energético. Para estos países, generalmente, se pueden considerar soluciones modernas que incorporen las nuevas tecnologías de sistemas *microgrids* para llevar energía a las comunidades aisladas y, al mismo tiempo, elementos que reduzcan las pérdidas en la T&D y detecten los robos de energía para las áreas urbanas. Es cierto que son muchos los factores en los cuales hay que intervenir para provocar efectos importantes en los países en vías de desarrollo. El acceso a educación y a formación apropiada, la proximidad de centros de demanda a áreas de producción de EERR, la disponibilidad de gasto público y la estabilidad política son algunos de los factores más significativos que hay que considerar. Por supuesto, los elementos que se pueden considerar son varios y muy diferentes entre ellos. Las diferencias tanto geográficas como sociales van a determinar los impactos y a cuantificar los beneficios relativos. Por lo tanto, identificar los parámetros que definen las condiciones locales, evaluar como las decisiones son influenciadas por el contexto y estimar el tiempo necesario para considerar rentable el proyecto son pasos determinantes para un buen análisis. A la luz de estas consideraciones se propone una tabla que ponga en evidencia algunas variables relativas a la fase de adaptación a las condiciones locales.

Variables	Unidad
Variación prevista en el consumo de energía	%
Variación prevista en el coste de energía	%
Reducción pérdidas energéticas en T&D	%
Interrupciones estimadas	minutos
Valor energía perdida	€/kWh
Taso de descuento	%
Incremento de renovables	%
Coste tecnologías (RI, renovables)	€
Vida útil estimada elementos	años
Calendario de ejecución	RI/años
Sistemas instalados en áreas rurales frente a áreas urbanas	%
Ahorro emisión contaminantes	€
Aumento nivel instrucción	%
Disminución muertos prematuros por contaminación	%

Tabla 2: variables locales

Las variables consideradas se refieren, como mencionado, a problemas comunes a todos los países en vías de desarrollo. Los inconvenientes que se destacan en la mayoría de los países en vías de desarrollo se refieren principalmente a la seguridad y fiabilidad de la red. Las tecnologías inteligentes operan también en este ámbito obteniendo resultados importantes. Para mejorar aún más estos aspectos se propone la agregación de las *Blockchain* y *Smart Contract* que consiguen ajustar de manera considerable las tecnologías a las condiciones locales. Para hacer una evaluación exhaustiva de estas dos tecnologías se dedica el capítulo 4 que evidencia el funcionamiento, la adaptación al contexto y los beneficios e impactos esperados. Las variables evidenciadas en la Tabla 2 se pueden resumir en cuatro macro áreas: económica, ambiental, tecnológica y social. A continuación, se propone una descripción de algunas de las variables evidenciadas en la tabla para lo que se refiere a los sistemas de Redes Inteligentes.

2.3.1. Aspectos económicos

i. Tasa de descuento

La tasa de descuento es de gran importancia en la evaluación de un sistema de RI. Esto es debido a que los costes son más relevantes en la fase inicial, cuando hay que invertir en las nuevas tecnologías e infraestructuras, y a que se beneficia económicamente de las instalaciones solo a largo plazo. [6] Una política pública de tasa de descuento es una solución óptima para incentivar los sistemas de RI. La razón fundamental para adoptar una política pública de descuento es la afirmación del valor social que representa una inversión en sistemas de RI para toda la sociedad. Para poder obtener buenos resultados de esta política es necesario que el país considerado tenga cierta estabilidad gubernamental. En la evaluación de estos países nos ayuda el índice FSI presentado por el *Fund for Peace* que cuantifica, mediante varios indicadores, el riesgo y por tanto la estabilidad de un país. El FSI utiliza varios niveles de riesgo y nos proporciona, además, datos sobre las tendencias en los últimos años.

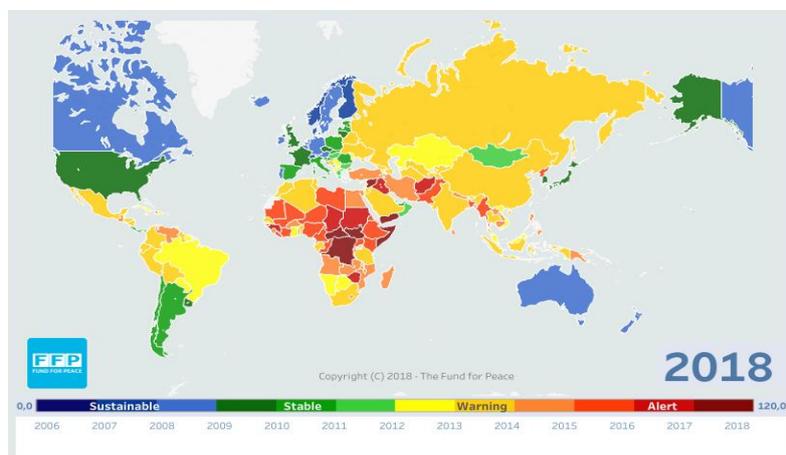


Figura 10: Mapa FSI

Para una visualización detallada de los indicadores y de la tabla se propone la consulta del enlace <http://fundforpeace.org/fsi/> .

ii. Coste de la tecnología

Hacer una evaluación del coste de la tecnología es muy complicado en fase preliminar porque es necesario tener en cuenta el caso particular. Es cierto que muchos de los dispositivos y de las técnicas que luego explicaremos tienen un coste inicial muy alto que luego se amortigua en el tiempo llevando muchos beneficios. Además, hay que considerar que en los países en vías de desarrollo el impacto social representa un factor determinante desde el punto de vista económico porque lleva consigo varios impactos secundarios que, en una visión a largo plazo, pueden definir un cambio y una crecida importante del país. Inicialmente, por tanto, hay un coste inicial significativo que va asociado al desarrollo de nuevos sistemas de transmisión, nuevos centros de GD, nuevas infraestructuras de medidores inteligentes y otras tecnologías. [2] De todas formas, para dar una idea de los costes de una instalación de RI se propone la visualización de la Tabla 3 que incluye los costes y las tecnologías de varios proyectos pilotos efectuados en Brasil.

Project Name	# of consumers	Annual budget (Million USD)	Budget/consumer (USD/consumer)	Project Focuses
Smart City	10,000	4.2	420	Urban: smart metering, distributed generation, energy storage, transportation, public lighting, grid automation, consumer awareness.
Smart Grid Program	84,000	5.925	70	Urban: transportation, distributed generation, smart metering, grid automation.
InovCity	15,000	3.100	206	Urban: smart metering, public lighting, transportation, grid automation, consumer awareness, distributed generation, energy efficient home devices.
Cities of the Future	95,000	3.55	37	Urban: smart metering, grid automation, distributed generation, smart home development.
Parintins project	145,000	1.80	12	Off grid thermal system: grid automation, smart metering.
Fernando de Noronha project	885	.883	998	Off grid thermal and renewable-sourced system: smart metering, distributed generation, energy storage, grid automation, transportation, public lighting.
Parana smart grid	10,000	7.85	785	Urban: grid automation, distributed generation, transportation, smart metering.

Tabla 3: Estimación de coste SG [2]

La duración de cada proyecto va de 2 a 7 años y nos proporciona informaciones sobre los costes asociados con el desarrollo de infraestructuras de RI in condiciones de falta de conexión al sistema energético. Los proyectos *Parintins* y *Fernando de Noronha*, son los únicos de los analizados que no

tienen conexión con la red eléctrica. Cada proyecto tiene enfoques específicos y la mayoría tiene una línea común, por ejemplo 6 de 7 proyectos incluyen EERR y 5 se enfocan en iluminación pública, transporte público o los dos. [2]

Se pueden sacar algunas conclusiones de los datos presentados en el estudio. Primero, no se evidencia una diferencia de coste entre la instalación en áreas urbanas o en áreas rurales. Es notable también que los dos proyectos *off-grid* representan el menos y el más caro de los analizados y esto puede ser relativo a la densidad de población. Dos proyectos resaltan por ser los más económicos, el *Cities of the future* y el *Parintins*. Estos proyectos tienen en común que en sus especificas no son previstos ni sistemas de iluminación pública ni de transporte que, por tanto, pueden ser los que mayormente contribuyen al aumento de coste per cápita. Finalmente se calcula el coste promedio de 361.14\$ por consumidor que puede ser considerado como el coste inicial para el desarrollo de un proyecto de RI. [2]

iii. Calendario de ejecución

El calendario de ejecución, en particular el cronograma de instalación de las tecnologías *Smart*, tiene un impacto importante sobre los resultados de análisis. Cronogramas diferentes pueden tener diferentes impactos en relación con los diferentes *stakeholders*. Esto puede llevar a empeoramientos de los beneficios considerados y por tanto a condiciones diferentes de las presupuestadas.

Hay muchos factores que determinan el desarrollo del calendario. Por ejemplo, hay que poner diferencias para instalaciones efectuadas en áreas urbanas o rurales. La diferencia en la instalación de tecnologías inteligentes, en términos de metros instalados/día, puede afectar el análisis final y su resultado. Otro factor que hay que considerar es la concentración de población y su demanda. Si hay que efectuar una instalación en un grande centro urbano, en un centro pequeño, en un área aislada o si, por ejemplo, la instalación es necesaria para uso residencial, comercial y/o industrial, es necesario tener en cuenta las fuertes diferencias entre estas opciones desde todos los puntos de vista. Es necesario, además, poner diferencias entre otras dos consideraciones: si la instalación se efectúa de forma concentrada (toda la ciudad, comunidad necesita de una instalación de RI) o de forma dispersa (solo los usuarios con grandes consumos instalan tecnologías de RI). Estos factores son de importancia fundamental para un correcto desarrollo del sistema y son objeto del análisis de sensibilidad.

2.3.2. Aspectos sociales

El desarrollo de RI, que comporta una electrificación tanto de las áreas urbanas como de las áreas rurales, tiene importantes implicaciones a nivel social. Como evidenciado, uno de los parámetros para evaluar la instalación de RI en los países en vías de desarrollo es el nivel de instrucción. La puesta en marcha de proyectos de RI afecta el aspecto social desde varios puntos de vista. En las áreas rurales, por ejemplo, resulta significativo involucrar los autóctonos en el proyecto. La creación de asociaciones de usuarios tanto para la instalación como para las etapas de Operación y Mantenimiento (en adelante O&M), lleva una mejora consistente en el ámbito instructivo. La formación de nativos es solo uno de los aspectos referido a la instrucción. Por ejemplo, hoy en día, la búsqueda de recursos fósiles para cocinar, iluminar y calentar es una actividad mayormente practicada por niños y mujeres que dedican un promedio de 1,4 h al día en coleccionar la leña necesaria. [1] El uso de este tipo de recursos, como kerosene y carbón, además, es causa directa de 2.8 millones de muertos prematuros cada año. [1]

Por lo tanto, podemos afirmar que la formación y la incentivación de usuarios nativos hacia la eficiencia energética es esencial, especialmente para los que no tenían acceso anteriormente. Además, hay que poner particular atención a las comunidades *off-grid* para que puedan manejar y mantener las mini redes óptimamente, para disminuir las diferencias sociales y mejorar la calidad de la vida. [6]

2.3.3. Aspectos ambientales

Desde el punto de vista ambiental las RI representan una mejora significativa. La unión de esta tecnología en una visión distribuida con las EERR determina un ahorro en emisiones muy importante. Como para los demás parámetros el aspecto ambiental afecta tanto las áreas urbanas como las rurales. En las áreas urbanas, de hecho, la continua sensibilización con relación al cambio climático y el incentivo siempre mayor en el uso de vehículos eléctricos son algunos de los aspectos considerados que contribuyen al éxito del proyecto. En las áreas rurales, en cambio, el uso de estas tecnologías, que puedan sustituir los combustibles de origen fósil, define una mejora de la calidad de la vida y una reducción en la deforestación. Estas mejoras se pueden considerar beneficios directos para los autóctonos y transversales para la sociedad en general. Poder gestionar de manera inteligente los flujos de potencia establece una disminución en las pérdidas en T&D y por tanto una disminución en la producción energética. El consumo, por tanto, es perfectamente adaptado a la producción reduciendo muchas toneladas de contaminantes en el aire. Con relación al país considerado y a su nivel de desarrollo, se pueden tener dos posibilidades. Hay países que tienen objetivos determinados en el

desarrollo de EERR y países que no. Esta condición precisa diferencia el calendario de ejecución y por tanto el desarrollo de las infraestructuras necesarias. En el caso de que el país tenga un objetivo con relación a la producción de energía por fuentes renovables, la inversión en SG es uno de los varios caminos para alcanzar la meta. Por tanto, es posible alcanzar el objetivo sin inversiones en RI variando los beneficios relativos que se referirán solo a un incremento de tecnologías renovables. [8] Otro enfoque es para situaciones en las cuales las RI permiten el desarrollo de EERR que no se producirían de otra manera. En este caso, es la inversión en las RI que permite la implementación de renovables que, por tanto, encarnan un beneficio subordinado a la tecnología “inteligente”. [8]

2.3.4. Aspectos tecnológicos

Para poder cualificar una tecnología como *Smart*, hay que considerar algunos factores imprescindibles. Los elementos que caracterizan una RI incluyen una amplia gama de tecnologías de comunicación, de gestión de la información y de control que contribuyan a la eficiencia y flexibilidad de las operaciones del sistema eléctrico. Estas tecnologías se pueden dividir en cuatro categorías:

- **Recolectores de informaciones:** Las funciones de las RI dependen de los datos que se coleccionan mediante diferentes sensores. Generalmente, dichos sensores, miden características de los elementos del sistema. Por ejemplo, se suelen utilizar medidores que midan continuamente potencia y energía entregada por un generador renovable y otros que midan las características eléctricas, voltaje, corriente, frecuencia, etcétera... de la red de distribución.
- **Clasificadores de información, pantallas y asesores:** Esta categoría incluye todos los elementos que reciben informaciones de parte de los sensores para que se analicen y se representen en pantallas.
- **Controladores basados en la información:** Estos dispositivos se sirven de los datos recibidos para controlar el funcionamiento de los demás dispositivos y conseguir una reducción del gasto de energía o una estabilización del voltaje.
- **Recursos de energía/potencia:** Se trata de tecnologías para generación, almacenamiento y reducción de la demanda. [12]

Las tecnologías “*Smart*” se pueden aplicar en diferentes tipologías de consumo, desde las grandes instalaciones hasta las pequeñas. Para cumplir las funciones de las RI necesitamos elementos tecnológicos específicos que efectúen las tareas relativas.

i. Broadband over Power Line

Para un sistema integrado de comunicaciones se utilizan métodos como el *Broadband over Power Line (BPL)*, la comunicación inalámbrica digital o cables de fibra híbrido. Las tres tecnologías son sistemas para comunicación de alta velocidad tanto de forma inalámbrica como de forma cableada. Entre las tres, la que despierta más curiosidad es el BPL.

El BPL es una tecnología que permite la transmisión de datos a través de las líneas de los servicios públicos. Esta tecnología utiliza ondas medias, ondas cortas y bandas bajas de *Very High Frequency (VHF)* para el traslado de datos. A pesar de que haya nacido para ofrecer acceso a Internet de alta velocidad, hoy en día el BPL se utiliza para ayudar los consumidores a manejar su consumo de energía gracias a la alta velocidad de transmisión de datos entre los aparatos, por ejemplo, de un edificio. [9]

ii. Supervisory Control and Data Acquisition

Para garantizar un suministro de alta calidad se utilizan técnicas de control avanzado que incluyan métodos de supervisión y sistemas de adquisición de datos (SCADA, *Supervisory Control and Data Acquisition*), y sistemas distribuidos de control inteligente para que las RI sean autocurativas. SCADA es un sistema computarizado que reúne y analiza datos en tiempo real para monitorear equipos sensibles a eventos y al tiempo. [11]

Un Sistema SCADA, en el momento en el cual ocurre un problema, reúne las informaciones relativas en una instalación central, alerta la estación de origen del fallo, llevando a cabo el análisis para determinar la criticidad del fallo, y presenta un informe final de manera lógica y organizada.

iii. Advanced Metering Infrastructure

Otro sistema muy importante en la instalación de RI es el *Advanced Metering Infrastructure (AMI)*. El AMI es un sistema integrado de contadores inteligentes, redes de comunicaciones y sistemas de gestión de datos que permite la comunicación bidireccional entre los servicios públicos y los clientes. A través de pantallas y de otros equipos para la gestión de energía, los clientes pueden manejar en tiempo real los flujos de potencia tanto en instalaciones residenciales como en instalaciones comerciales e industriales. [10]

iv. Demand Response

La *Demand Response* (DR) se refiere a técnicas para reducir la carga eléctrica tanto durante las HP como durante la caída de producción de EERR. Aplicando dichas técnicas, por lo tanto, se evita el uso de grandes plantas de generación, de instalación de nuevas infraestructuras para las etapas de generación y transmisión y se mitigan los eventos de caídas de tensión y apagones. Además, la DR permite, junta a las renovables, de manejar la demanda con relación a las condiciones atmosféricas. Por ejemplo, si hubiese un día nublado no tendríamos producción fotovoltaica y por tanto habría que reducir la demanda energética. [12]

Hay tres categorías principales de DR: *Advanced Energy Pricing*, *Direct Load Control* (DLC), *Voluntary Load Reduction* (VLR).

- ***Advanced Energy Pricing***: Se refiere al uso de numerosos programas para regular lo más precisamente posible el precio de la energía en función del coste de producción en tiempo real. Se propone al usuario de elegir entre varias fuentes energéticas con diferente fiabilidad y precio, suministrando tanto energía a bajo coste como energía altamente fiable, por tanto costosa, a los que la necesitan.
- ***Direct Load Control***: Las empresas de SP conceden un control limitado ad algunos usuarios, bajo un trato que incluye incentivos. Los usuarios manejan directamente los flujos de energía para utilizar lo que se produce *in loco* y evitar de poner en marcha las grandes centrales de generación.
- ***Voluntary Load Reduction***: Se trata de utilizar incentivos para los usuarios para reducir voluntariamente el consumo energético con relación a momentos del día. Por ejemplo, en las HP el coste de la energía es más alto para disuadir su uso mientras se incentiva cuando el coste es más bajo.

Reducir la carga en la red evita la necesidad de incrementar la capacidad instalada y, por lo tanto, la obligación a tener más centrales. La DR puede ser manejada tanto de parte de los SP como de parte de terceros (intermediarios que unen comunidades de usuarios y que venden los excedentes a los SP).

v. Distribution Automation

Distribution Automation (DA), se refiere, generalmente, a varias técnicas de control automático que optimizan el funcionamiento de la red de distribución. DA es una parte fundamental de las SG por que comunica con los demás dispositivos para que la red sea más eficaz y fiable. El ajuste dinámico

de los controles permite una habilitación de las EERR adecuada a la variabilidad de la producción, al aumento de potencia y a los flujos bidireccionales. [12]

- ***Automated Fault Location and Restoration***: se trata de la detección automática de fallos y de su restauración. Las redes de distribución utilizan interruptores y conmutadores para aislar un fallo y limitar el número de usuarios afectados. Estos dispositivos (*recloser*) simplemente se abren y se cierran limitando el daño y desconectando la menor zona posible afectada. La agregación de sensores en estos aparatos y su control pueden reducir la frecuencia y la duración de las interrupciones localizando más precisamente los fallos y aislando pequeñas partes de la red.
- ***O&M***: La introducción del control y de sensores en la red de distribución aporta importantes ahorros en las operaciones y mantenimiento. Un sistema avanzado de monitoreo puede prever el fallo de un dispositivo, por ejemplo, un transformador, y planificar su sustitución antes que pase un apagón. Si los sensores están bien colocados, se pueden obtener informaciones más precisas e inmediatas de eventuales apagones con respecto al método tradicional que consiste en confiar en las declaraciones de los usuarios.
- ***Distributed Resource Integration***: La integración de recursos distribuidos, como las EERR y el almacenamiento de energía, pueden integrarse en las técnicas DA especialmente si incorporadas con los SI. La previsión de producción por EERR puede ser integrada en las operaciones de distribución para optimizar el funcionamiento de la red como proveer al suministro local de potencia, reducir las pérdidas en las líneas y el estrés en los dispositivos.

vi. Renewable Resource Forecast

La previsión y la estimación de potencia producida por recursos solares y eólicos, si precisas, pueden reducir los problemas relativos a la variabilidad de las EERR. Se utilizan dos métodos de previsión con relación al tiempo:

- ***Uno/dos días antes***: se prevé el tiempo utilizando modelos con resolución en un rango de tiempo de 1-3h y de 1 km de espacio. El modelo, conocido como *Numerical Weather Prediction* (NWP), utiliza una gran cantidad de datos recogidos por ordenadores de alto rendimiento para las previsiones meteorológicas. Además, se incorporan datos relativos a la geografía y topología para reducir los eventuales errores en la previsión.
- ***Una/ seis horas antes***: estima, utilizando modelos estadísticos, el tiempo futuro dependiendo de las condiciones locales en tiempo real.

La introducción de las previsiones en las operaciones y en el control de la red se están desarrollando especialmente en áreas con fuerte penetración de EERR. Mientras para la producción eólica la previsión es prioritaria determinando ahorros consistentes, para la solar todavía no presenta un consistente grado de madurez. De momento se utiliza para grandes plantas fotovoltaicas, aunque en el próximo futuro se prevé un uso para sistemas fotovoltaicos distribuidos y microrredes con grandes capacidades. [12]

vii. Smart Inverters

Los inversores tradicionales son elementos que transforman la corriente continua, por ejemplo, la corriente de salida de un sistema fotovoltaico, en corriente alterna que puede ser inyectada en la red o utilizada en el sitio de producción. La variabilidad de las fuentes renovables puede causar algunos inconvenientes en la red. Las fluctuaciones transitorias del voltaje y las desviaciones de frecuencia son lo más comunes. Para mitigar estos problemas y, en algunos casos, incluso mejorar la calidad de la red eléctrica, se utilizan los *Smart Inverters*. Estos cumplen las mismas funciones de los inversores tradicionales y además mejoran la integración de las fuentes renovables por medio de sofisticados métodos de comunicación y monitoreo, capacidad de recibir instrucciones externas y la posibilidad de tomar decisiones autónomas para mantener la estabilidad de la red. [12]

Las funciones proporcionadas por los SI son las siguientes:

- Los SI pueden ayudar un sistema de generación distribuida en mantenerse en línea durante perturbaciones de frecuencia o tensión relativamente cortas.
- Los SI, gracias a su capacidad de inyectar o absorber electricidad en o por la red, pueden ayudar en el mantenimiento de la estabilidad del sistema manteniendo el voltaje y el nivel de frecuencia entre los límites especificados.
- Lo SI, después de un apagón, regulan gradualmente la reconexión del elemento de GD a la red para evitar picos de potencia y limitar el riesgo de provocar otra perturbación.

viii. Distributed Storage

La utilización de renovables implica una grande variabilidad e imprevisibilidad. El almacenamiento energético se propone como herramienta extremadamente útil para volver la red más flexible y eficaz. El almacenamiento energético se puede dividir en dos grupos: grueso, que entrega grandes cantidades de energía (múltiples MW) en un largo intervalo de tiempo, y distribuido, que entrega cantidades inferiores de energía (KW) en un pequeño intervalo de tiempo. Tecnologías como las baterías ion litio, las baterías plomo ácido, las baterías de flujo, las baterías de hidrogeno, los volantes de inercia

y los supercondensadores representan los dispositivos más utilizados hoy en día para el almacenamiento de cantidades medio-pequeñas de energía. Para cantidades mayores el bombeo hidráulico representa la tecnología más eficaz y madura. Vamos a enfocar el estudio sobre las tecnologías que facilitan la integración de renovables en una visión de GD y sobre sus beneficios. Dichos beneficios se pueden resumir en unos puntos:

- Regulación frecuencia y voltaje de la red
- Nivelación picos de producción renovable
- Generación de respaldo

La implementación de DS nos da la posibilidad de gestionar la potencia producida por EERR a la necesidad. Entre los dispositivos mencionados las baterías ion-litio y las baterías plomo ácido representan las más viables y maduras. Los supercondensadores y los volantes de inercia no se consideran adecuados porque entregan mucha potencia para un intervalo de tiempo muy corto y las demás tecnologías, como las baterías de flujo, tienen un coste muy alto frente a una baja madurez de la tecnología. Finalmente, el bombeo hidráulico, aunque sea el más utilizado para el almacenamiento a nivel mundial, necesita de grandes cantidades para almacenar y de condiciones morfológicas que difícilmente se adaptan a los países en vías de desarrollo. [12]

ix. Microgrids

Las microrredes son partes de redes que pueden desconectarse de la red principal y operar en modo isla. Las microrredes generalmente son de pequeña escala y se considera la solución más apropiada para los países en vías de desarrollo. Normalmente las microrredes constan de:

- Controles inteligentes para gestionar la conexión y la desconexión de la red central
- Recursos propios de energía
- Control para optimizar los recursos de la microrred

Las microrredes pueden trabajar en modo “isla” para varias razones. Cuando, por ejemplo, hay una interrupción de suministro en la red principal o cuando la calidad de la potencia es muy baja, las microrredes se aíslan de la red, mediante interruptores inteligentes, utilizando tanto la energía producida por EERR y otros generadores, como la energía almacenada. En países donde la calidad y la fiabilidad de red son muy bajas, esta solución representa la condición más viable para la producción de energía. [12] A continuación, se resume en la Tabla 4 las varias tecnologías, su coste estimado y otras características relevantes.

Tecnología	Coste inicial y de O&M	Tiempo de devolución	Efectos mitigados	Aplicación en la red	Dependencia de existencia de	Sinergias
Advanced Metering Infrastructure	100-150 \$/metro, 200-2500 \$ con tecnologías de comunicación y <i>Information Technologies</i> ; O&M 1 \$/m/mes	3-10 años dependiendo si sistema existente o nuevo	Detección apagones, robo energía, monitoreo red de distribución	Todas	Interoperabilidad	DR; DA
Demand Response	100-250 \$/kW; O&M bajos	<3 años	Frecuencia apagones, picos de carga	Todas	AMI	SI; AMI; Microgrids
Distribution Automation	Fuerte dependencia con la tecnología e instalación	Depende de las tecnologías y de las características de la red	Frecuencia y durada apagones, regulación voltaje, costes mantenimiento	Todas	Interoperabilidad	AMI; DR; DS; SI; RRF; Microgrids
Renewable Resource Forecasting	O&M 2.500/mes/instalación	<1 año	Regulación frecuencia y voltaje, variabilidad coste EERR	>10% EERR	Disponibilidad servicios locales	Microgrids; DA; DS
Smart Inverters	<5% con respecto a los inversores “normales”	Depende de tecnología y método de pago	Calidad de potencia, regulación voltaje y frecuencia	Todas	Entorno regulatorio favorable	DR; AMI; Microgrids
Distributed Storage	Li-ion: 700-1000 \$/kWh	Depende del mercado	Regulación frecuencia y voltaje	>20-30% EERR		AMI; DA; Microgrids; RRF
Microgrids	Depende de las tecnologías empleadas	Depende de las tecnologías empleadas	Apagones, variabilidad EERR, calidad de potencia	GD	Entorno regulatorio favorable	SI; DS; DA; RRF

Tabla 4: Resumen tecnologías y sus características principales

2.4. *Análisis de sensibilidad*

Se propone la implementación de un análisis de sensibilidad para las suposiciones hechas y las variables consideradas en el planteamiento de la metodología.

El análisis de sensibilidad es una metodología para determinar la consistencia de una evaluación. Se utiliza para verificar la validez de las hipótesis, coleccionar informaciones para efectuar previsiones y comprender más el funcionamiento del sistema.

La importancia de los beneficios para los diferentes países es afectada por muchos factores: económicos, geográficos, demográficos, etcétera...

Las características propias de la red eléctrica y las directrices para implementar un proyecto de SG pueden variar mucho de un país a otro. Por ejemplo, dependiendo de los gastos, de la densidad de generadores y de muchas más condiciones pueden variar las estimaciones de reducción de coste, de los apagones y del robo de energía. [6]

Además, el análisis coste beneficios se basa en estimaciones y previsiones de cantidades variables, como el aumento de la demanda eléctrica y, por supuesto, los costes y los beneficios. Estas previsiones necesitan de un análisis de sensibilidad, como pueden ser muy diferentes de los valores realmente alcanzados, para considerar cambios en las variables clave y la rentabilidad de proyecto. [6]

Generalmente el análisis de sensibilidad se efectúa mediante dos parámetros *Internal Rate of Return* (IRR) o *Net Present Value* (NPV), con el objetivo de encontrar un rango de variables que llevan a un resultado positivo.

2.5. Análisis cualitativo

En la evaluación de un proyecto hay que considerar tanto los beneficios cuantificables como los no cuantificables. Hay algunos aspectos de los beneficios que no se pueden monetizar fácilmente y que se incluyen, por ejemplo, en el impacto social. Todos estos aspectos, como la creación de trabajo, el aumento del conocimiento, el mejoramiento de las condiciones de seguridad y la aceptación social tiene un fuerte efecto sobre la sociedad y tienen que ser evaluadas cualitativamente en el análisis coste beneficios. [6]

Para efectuar un análisis cualitativo es importante, por tanto, considerar la contribución del proyecto a los objetivos propios del país e identificar y valorar los impactos con respecto a la sociedad. Es recomendable expresar los impactos en cantidades físicas y cuando no es posible con descripciones detalladas de los resultados esperados.

Al final de la evaluación, por tanto, los responsables de la toma de decisiones tienen que presentar un juicio sobre el valor relativo de los beneficios cualitativos para la decisión en cuestión. El análisis coste beneficio puede mitigar las incertidumbres, pero no eliminarlas.

3. *Definición de la metodología propuesta*

Para evaluar un proyecto de RI hay que tener en cuenta numerosos factores tanto económicos como sociales y medioambientales. Para efectuar un análisis completo es necesario efectuar un análisis costes-beneficios (en adelante CBA) que, sea integrada por una perspectiva social y una evaluación cualitativa de los resultados. Para la evaluación económica de proyectos de RI existen varias metodologías. La más utilizada es la desarrollada por el *Electric Power Research Institute* (EPRI) y luego modificada por el *Joint Research Center* (JRC) de la *European Commission* (EC). Dicha metodología de evaluación, como se refiere generalmente a países desarrollados, tiene que ser modificada para adaptarse a las condiciones y a las necesidades de los países en vías de desarrollo.

La red eléctrica de los países en vías de desarrollo difiere de los países desarrollados y estas diferencias pueden crear una oportunidad para el desarrollo de las RI. La inexistencia o la expansión de la red eléctrica, para alcanzar comunidades que todavía no tienen acceso a la electricidad, puede ser una ventaja para la instalación de RI. En lugar de instalar sistemas de T&D tradicionales o de convertir las infraestructuras existentes se puede colocar una red moderna y más fiable. Las RI permiten servicios innovativos que pueden ayudar en alcanzar los objetivos de acceso universal a la red como pagos a través de móviles, construcción de microrredes, etcétera...

Otros factores que caracterizan negativamente los sistemas eléctricos de los países en vías de desarrollo son el robo de energía y las pérdidas técnicas en general. Las RI, pueden detectar eventuales robos, apagones y fallos, resolver el problema o mitigarlo mejorando la seguridad y la fiabilidad del sistema. Los problemas evidenciados pueden tener varias naturas como problemas técnicos o relativos a fenómenos naturales (relámpagos, caídas de árboles, y muchos más). [8]

3.1. *Síntesis de la metodología*

La metodología propuesta identifica y cuantifica los beneficios de un sistema de RI adaptados de las propuestas por el JRC que a su vez se refiere a la metodología EPRI. Para una correcta evaluación adaptamos la metodología propuesta por pasos a los países en vías de desarrollo.

Primero se enumeran las tecnologías *Smart* que se implementan (*Step 1*). Cada tecnología luego se relaciona con las funciones que proporciona (*Step 2*), y luego cada función con los beneficios que suministra (*Step 3*). Se monetiza el valor económico de cada beneficio (*Step 4*), se cuantifican los costes (*Step 5*) y luego se relacionan los costes con los beneficios (*Step 6*). Finalmente se efectúa el análisis de sensibilidad (*Step 7*).

3.2. *Definición de beneficio*

Para poder efectuar un CBA hay que definir de manera precisa el significado de beneficio. Los beneficios se pueden considerar como impactos cuantificables en términos monetarios. Por tanto, si hablamos de beneficio es necesario que corresponda una mejora directa diferente de los “impactos”, que se pueden referir a mejoras no cuantificables. En el panorama de beneficios relativos a las instalaciones de RI podemos reconocer los siguientes:

- Costes inferiores para los usuarios. Estos pueden ser consecuencia del uso de medidores inteligentes que aplanan la curva de la carga bajando el precio de la electricidad en las HP y, al mismo tiempo, de un cambio de acostumbre de los mismos usuarios gracias a una política de incentivos para reducir el consumo de energía en las HP.
- Pérdidas inferiores en la etapa de T&D consecuencia del uso de GD que, reduciendo las distancias entre los generadores y los consumidores, mitiga las pérdidas.
- Disminución costes de las O&M debidos a fallos menos frecuentes en los dispositivos.
- Reducción costes de la congestión en la transmisión. Esta reducción es consecuencia da una mejor capacidad de transmisión por los servicios existentes.
- Reducción costes de interrupción de potencia. Resultado de disminución en número y en tiempo de las interrupciones de suministro.
- Mejor calidad de potencia. Relativa a frecuencias inferior tanto de apagones como de subidas y caídas de tensión.
- Reducción de daños por las emisiones de gas efecto invernadero. Esto se puede referir a un decremento del consumo energético relativo a una concienciación de los gastos de cada usuario, menos pérdidas en T&D y a generación por EERR.
- Ampliación vida útil tanto de las centrales de generación como de los dispositivos para la T&D

Una vez definido el concepto de “beneficio” vamos a evidenciar la diferencia de esto con los conceptos de impacto y de resultados intermedio. Por ejemplo, un resultado intermedio se puede considerar la participación de los usuarios. Esto no es directamente un beneficio económico, pero lleva a una reducción en la factura de los usuarios que es un propiamente un beneficio. La reducción de los picos es un impacto que, pero lleva a una reducción en los costes de generación y distribución para las empresas de SP. Es un impacto también el incremento de EERR que lleva a una disminución de emisiones de contaminantes y gases de efecto invernadero. Los beneficios reales, por tanto, son estas reducciones evidenciadas que moderan los efectos sobre la salud, el medioambiente y los demás riesgos y daños debidos al cambio climático.

3.3. *Categorías de beneficios*

Los beneficios, realmente, se pueden dividir en 4 categorías principales:

i. Económicos

La reducción de los costes o el incremento en la producción de energía al mismo precio por medio de mejoras en la eficiencia del sistema, reducción costes en T&D y O&M, reducción pérdidas en T&D y reducción robo de energía.

ii. Fiabilidad y calidad de potencia

Reducción coste interrupciones de suministro energético, reducción coste debido a mejoras en la calidad de la potencia.

iii. Medioambientales

Reducciones de emisiones de contaminantes y, por lo tanto, de efectos sobre la salud humana y sobre el ecosistema.

iv. Seguridad y Estabilidad

Mejoras en la producción de energía, mediante EERR, aumento de la *cyber-security* (BC *technology*, SC), y reducción de lesiones, muertes y daños a los dispositivos.

Cada beneficio puede pertenecer a más de una categoría evidenciada. Por ejemplo, es notable que algunas funciones que desempeñan las RI, como la reducción de las pérdidas en T&D, no solo representa un beneficio económico sino también a una reducción de emisiones de contaminantes, que es un beneficio medioambiental. [13]

3.4. *Beneficiarios*

Los resultados de un proyecto de RI interesan un amplio rango de *stakeholders*. Estos son los beneficiarios de la instalación de la tecnología y se pueden dividir en tres grupos principales:

- **Las empresas de SP**-son los proveedores de potencia e incluyen tanto las compañías que generan potencia, como las que se ocupan de la T&D. Los beneficios son transmitidos a los contribuyentes y su cantidad varía de caso en caso.

- **Los usuarios**-son los destinatarios de la energía eléctrica. Son contribuyentes que benefician de las mejoras propuestas por las empresas de SP. Entre estos se evidencia por ejemplo la reducción de las tarifas eléctricas, la reducción de eventuales daños debidos a apagones y mejoras en la calidad de la potencia.
- **La sociedad** - generalmente incorpora todos los efectos tanto los positivos como los negativos. Normalmente los beneficiarios no son fácilmente identificables y los relativos beneficios relativos tampoco no reflejándose totalmente en la factura eléctrica.

3.5. *Análisis coste beneficio*

Paso1: Definición del proyecto

El primer paso, a la hora de comenzar el CBA, es efectuar una descripción clara del proyecto. Entre las informaciones generales que se proporcionan es importante incorporar informaciones generales del proyecto como:

- El tamaño del proyecto – en sus usuarios, cantidad de energía consumida por año
- Las tecnologías que se van a instalar y sus funciones.
- Las características del sistema eléctrico local
- Los diferentes *stakeholders*
- Los objetivos del proyecto, los beneficios y los impactos
- El marco regulador y su influencia sobre el proyecto [6]

Por las condiciones particulares de los países en vías de desarrollo, los objetivos de un proyecto de RI y las relativas tecnologías para cumplirlos son diferentes de aquellos y aquellas de un país desarrollado. La presencia de comunidades aisladas de la red eléctrica, los problemas relativos a la fiabilidad, la seguridad (como apagones, robo de energía) y a la optimización del consumo energético son las características principales que se propone de solucionar mediante la instalación de RI.

Se consideran, por tanto, 7 tipologías de tecnologías inteligentes que tienen las características aptas para conseguir el resultado propuesto. En el párrafo 2.7., de iii a ix, se han las tecnologías que vamos a tener en cuenta para los países en vías de desarrollo que vamos a recordar brevemente:

1.*Advanced Smart Metering*

2.*Demand Response*

3.*Distributed Automation*

4.*Renewable Resource Forecasting*

5.Smart Inverters

6.Distributed Storage

7.Microgrids

El proyecto involucra todos los diferentes *stakeholders* que tienen intereses específicos sobre el éxito. Los usuarios están más interesados en los ahorros en la factura manteniendo un servicio fiable. Las empresas de servicio público son interesadas en el óptimo funcionamiento de los dispositivos, en el nivel de satisfacción de los usuarios y en si el aumento de comunicaciones e informaciones es rentable. Los vendedores están interesados en si sus soluciones pueden representar un negocio lucrativo. Y las entidades reguladoras en todos los aspectos mencionados para que sean un input para soluciones futuras. [13]

Paso 2: Relacionar tecnologías con funciones

Una vez identificada las tecnologías y las condiciones iniciales, el siguiente paso es relacionar cada tecnología con cada función potencial. En este estudio se consideran 10 funciones y se estima cual de función activa cada tecnología. Cada tecnología puede activar más de una función y cada función puede ser activada por más de una tecnología. En la tabla siguiente se presenta un ejemplo que puede ser modificado en relación con las necesidades. [8]

Funciones	AMI Smart Meter	Demand Response	Distributed Automatisation	Renewable Resource Forecasting	Smart Inverter	Distributed Storage	Microgrids
Detección, aislamiento y reparación fallos	X		X				
Control flujos potencia bidireccionales					X		
Volt-VAR control					X		
Diagnosis y notificación condiciones dispositivos			X				
Flexibilidad red, GD y almacenamiento		X		X		X	X
Control frecuencia					X	X	
Optimización uso energía para los usuarios	X	X					X
Control EERR					X		X
Informaciones recursos energéticos				X			
Suavizamiento curva picos de carga	X	X				X	X

Tabla 5: Relación tecnologías con funciones

Paso 3: Relacionar funciones con beneficios

Después de haber relacionado las tecnologías con las funciones, vamos a conectar la últimas con los beneficios. Un beneficio es, como dicho en 3.2., un impacto cuantificable en términos monetarios. Se han considerado 10 beneficios. Al efectuar el análisis es necesario considerar cada función individualmente y evaluar cómo puede contribuir a alguno de los beneficios.

Beneficios	Detección, aislamiento y reparación fallos	Control flujos potencia bidireccionales	Volt-VAR control	Diagnosis y notificación condiciones dispositivos	Flexibilidad red, GD y almacenamiento	Control frecuencia	Optimización uso energía para los usuarios	Control EERR	Informaciones recursos energéticos	Suavizamiento curva picos de carga
Optimización operaciones de generación					X			X	X	X
Reducción costes de producción secundaria		X				X				
Reducción fallos en los dispositivos		X	X	X						
Reducción costes O&M	X		X	X		X				
Reducción robo de energía	X	X								
Reducción pérdidas eléctricas		X	X		X	X				X
Reducción coste de la electricidad							X	X		
Reducción apagones	X	X			X					
Reducción fluctuaciones de tensión			X				X			
Reducción emisiones de contaminantes			X		X			X	X	

Tabla 6: Relación funciones con beneficios

Paso 4: Monetizar/Rentabilizar beneficios

Una vez individuados los beneficios principales, el paso siguiente es estimar para cada uno de ellos su valor monetario. El valor de cada beneficio tiene que ser relativo al punto de partida y medir el ahorro económico con respecto a esto.

Este paso es el punto crucial del CBA y evalúa no solo el valor monetario de los beneficios, sino también a quien entre los diferentes *stakeholders* se refiere. Generalmente, se reconocen 3 grupos de distintos *stakeholders*: los operadores de la red, los usuarios y la sociedad en general.

Es importante, en la evaluación, determinar a qué etapa del proyecto corresponde cada beneficio y estimar su valor para cada año de funcionamiento.

A continuación, se ofrece una descripción de los beneficios propuestos en el estudio y se añade, además, el directo beneficiario para cada beneficio.

- ***Optimización operaciones de generación***

Este beneficio depende de dos factores: evitar el arranque de generadores y mejorar la eficiencia ajustando los niveles de output óptimos para cada generador.

El beneficio se puede calcular como el coste anual total de generación en el caso inicial menos el coste anual total de generación con la tecnología propuesta. [8]

Los primeros beneficiarios son las empresas de SP.

- ***Reducción costes de producción secundaria***

Por servicios secundarios se entienden las funciones que permiten que la generación corresponda a la demanda. Estos servicios son necesarios para mantener la transmisión de energía se pueden incluir la regulación de la frecuencia, la gestión del voltaje en la red, la programación y despacho etcétera... En los países en vías de desarrollo los operadores de la red proveen a los dispositivos aptos porque son parte necesaria para la estabilidad de la red.

Los beneficios relativos son difíciles de estimar debido a una gran variación en los precios. Sin duda, para algunas configuraciones (como, almacenamiento, DR y SI) es posible evaluar la cantidad de servicios secundarios esperados. El valor de una pequeña reducción, en la necesidad de servicios secundarios, puede ser estimado multiplicando la cantidad del servicio efectuado (por ejemplo,

regulación de frecuencia) por el valor unitario de esto (previsión de regulación de frecuencia por año. Este método se considera viable si el total de los servicios auxiliares en el proyecto de RI es pequeño con relación al total de estos en condiciones iniciales, de manera que el precio del servicio no es afectado por la crecida o disminución de suministro. [8]

Los primeros beneficiarios son las empresas de SP.

- ***Reducción fallos en los dispositivos***

Este beneficio es el resultado de dos condiciones. La primera condición es la exposición reducida de los dispositivos a fallos de corriente o sobrecargas. En este caso el beneficio es igual al coste de reemplazo multiplicado por las partes sustituidas causadas por fallos de corriente o sobrecargas evitables.

La segunda condición es el monitoreo y la diagnosis de las condiciones de los dispositivos. Es este otro caso el beneficio equivale al coste del reemplazo multiplicado por la parte de las sustituciones que hubieran podido ser evitadas si se hubiera utilizado las tecnologías de monitoreo y diagnosis. [8]

- ***Reducción costes O&M***

Los beneficios relativos a la etapa de Operación y Mantenimiento de la red son realizados mediante varios procedimientos que se efectúan en la primera o en la segunda subetapa.

Para la Operación el beneficio se alcanza gracias a sistemas avanzados de automatización (interruptores inteligentes, bancos de capacitores). El valor del beneficio es simplemente la diferencia entre el coste (anual) para la activación y desactivación (conmutación) de los alimentadores y capacitores en las condiciones iniciales, menos el mismo coste con la instalación de una RI.

Para el Mantenimiento el beneficio se realiza cuando un mejor monitoreo y diagnosis de las condiciones de los dispositivos llevan a una mejor planificación de la manutención y sustitución de los dispositivos. Básicamente, el beneficio equivale a la diferencia entre el coste de manutención en las condiciones iniciales y el coste de manutención en el caso de un proyecto de SG. [8]

Los primeros beneficiarios son las empresas de SP.

- ***Reducción robo de energía***

El robo de energía es uno de los problemas principales de los países en vías de desarrollo y, por tanto, uno de los retos más importantes de las RI. Las tecnologías inteligentes pueden ayudar en la localización y en la eliminación del robo de electricidad. El valor de este beneficio es igual al valor anual esperado de reducción en el robo energético (en kWh) por el precio minorista de esta energía.

Se puede estimar el total de la electricidad robada en un sistema restando la carga medida y las pérdidas estimadas de la generación medida. Este beneficio se puede monetizar estimando la cantidad de energía recuperada de los robos gracias al proyecto de RI. [8]

Los primeros beneficiarios son las empresas de SP.

- ***Reducción pérdidas eléctricas***

El valor anual de este beneficio corresponde al producto entre la reducción en las pérdidas esperada (en kWh) por el precio mayorista de la electricidad. La evaluación de este beneficio necesita un estudio sobre el coste de la electricidad en tiempo real, sobre todo si la mayoría de las reducciones en las pérdidas pasan todas en un rango determinado del día. [8]

Los primeros beneficiarios son las empresas de SP.

- ***Reducción coste de la electricidad***

De este beneficio aprovechan los usuarios. Su valor anual es simplemente la diferencia entre la factura del cliente antes y después de la instalación de la RI. Este beneficio depende de cuanto una determinada tecnología consigue reducir el uso de energía y la demanda pico. Por ejemplo, se estima que la técnica DR lleva ahorros de, aproximadamente, un 15%. [8]

Los primeros beneficiarios son los usuarios.

- ***Reducción apagones***

Los beneficios relativos a la reducción de los apagones se pueden monetizar mediante el uso del *Value Of Lost Load* (VOLL). [13]

Dichos beneficios se refieren a los usuarios cuya fiabilidad aumenta al disminuir de los apagones. El VOLL por kWh es función de muchos factores como la tipología de los usuarios y el nivel económico local. Para efectuar una estimación precisa, el *Department Of Energy* (DOA) de EEUU proporciona un calculador *on line* que estima el VOLL. Como el cálculo está pensado para los EEUU, para adaptarlo a los países en vías de desarrollo hay que escalar, en el resultado propuesto, la ratio entre el Producto Interno Bruto (PIB) local y el PIB de EEUU. Los valores relativos por país se pueden encontrar en la página web <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD> .

El VOLL puede ser medido también en términos de interrupción de suministro en lugar de kWh. En este caso variará en relación con la duración del apagón. [8]

Los primeros beneficiarios son los usuarios.

- ***Reducción de las fluctuaciones de la tensión***

La reducción del aumento y de la caída de tensión es un beneficio principalmente para los usuarios. Se puede aplicar el índice VOLL para calcular este fenómeno multiplicándolo por las reducciones de los eventos de variabilidad de tensión. Para estimar precisamente este fenómeno hay que considerar la frecuencia de estos eventos que depende, por supuesto, de la presencia de sistemas de RI. [8]

Los primeros beneficiarios son los usuarios.

- ***Reducción emisiones contaminantes***

La reducción de emisiones de contaminantes es un beneficio para la sociedad en general. Además de un valor social, esta reducción tiene un valor económico para toda la sociedad. Se estima que el coste de las emisiones de CO₂, por ejemplo, es en el rango de 40 a 120 \$ por tonelada métrica. [20]

Otras emisiones de contaminantes como SO_x y NO_x pueden ser monetizados con relación a la reducción del impacto sobre la salud humana y el ambiente. Un estudio del *National Research Council* hace una estimación monetaria de los impactos de estos contaminantes. [21]

El beneficiario principal es la sociedad en general.

- **Beneficios cualitativos**

Además de los beneficios cuantificables económicamente, hay otros, consecuencia de la RI que son más difíciles de cuantificar. Si los proyectos de RI son utilizados para entregar electricidad a comunidades que antes no tenían conexión a la red eléctrica los beneficios relativos son difícilmente cuantificables. Un aumento del nivel de instrucción de los autóctonos, un mejoramiento de la seguridad y de la fuerza laboral, un progreso de las condiciones de salud debidas, por ejemplo, a una reducción del consumo de combustibles de origen fósil para cocinar y a un acceso facilitado a la asistencia médica son algunos de los beneficios evaluables cualitativamente.

Beneficios	Valor típico	Método de evaluación	Beneficiarios
Optimización operaciones de generación	4-10 \$/MWh dependiendo de la penetración de renovables	Estimación basada en estudios precedentes	Empresa de servicios públicos
Reducción costes de producción secundaria	Regulación de frecuencia 20-60 \$/MWh; regulación de voltaje 25-75 \$/MVARh	(Valor unidad de producción secundaria) *(unidad de producción secundaria no instaladas)	Empresa de servicios públicos
Reducción fallos en los dispositivos	Depende de la tipología de los dispositivos y de los métodos de reducción de fallos	(Coste total de sustitución) * (fallos reducidos gracias a diagnosis)	Empresa de servicios públicos
Reducción costes O&M	Fuerte dependencia con proyecto	(Costes de O&M punto de referencia) - (costes de O&M de proyecto)	Empresa de servicios públicos
Reducción robo de energía	Usuarios: 0.02-0.22 \$/kWh; Industrial: 0.01-0.22 \$/kWh	(Coste de comercio por kWh) * (reducción en kWh robados)	Empresa de servicios públicos
Reducción pérdidas eléctricas	0.01-0.08 \$/kWh	(Coste generalizado por kWh perdido) * (reducción en kWh perdidos)	Empresa de servicios públicos
Reducción coste de la electricidad	Usuarios: 0.02-0.22 \$/kWh; Industrial: 0.01-0.22 \$/kWh	(Expected annual loss in kWh) * (Retail energy price)	Usuarios
Reducción apagones	2-5 \$ por kWh perdido	(VOLL por kWh o apagón) * (reducción de kWh en apagones o reducción de apagones)	Usuarios
Reducción aumentos y caídas de tensión	Dependiente de casa usuario	(VOLL por variación de voltaje) * (reducción de las variaciones)	Usuarios
Reducción emisiones de contaminantes	40-140 \$/ton CO ₂ ; 6300-6600 \$/ ton SO _x ; 1400-1900 \$/ton NO _x	(toneladas de contaminantes evitadas) * (coste por toneladas de contaminantes)	Sociedad

Tabla 7: Cuantificación beneficios; Fuente: IRENA

Paso 5: Cuantificar costes

Los costes del proyecto de RI dependen solo de aquellos gastos relativos a esta fase, sin considerar los costes asociados a las operaciones ordinarias del sistema. En la estimación de los costes resultan algunos valores que sufren de una fuerte incertidumbre. Los sobrecostes relativos a la falta de experiencia con las tecnologías *Smart*, los gastos de comercialización inesperados para aquellas tecnologías que requieren una participación de los usuarios y la integración de nuevas tecnologías en la red existente por parte de varios vendedores son las incertidumbres más evidentes en la evaluación propuesta.

Se pueden dividir los costes en 4 categorías:

1. **Costes iniciales** – son gastos que se aplican una vez y son relativos a la compra de los dispositivos específicos
2. **Costes de ejecución del proyecto** – son asociados a la entrega de dispositivos, la instalación, planificación y gestión del proyecto, y otras partes en la ejecución de esto. Es necesario tener en cuenta si la tecnología necesita o menos la asunción de personal adicional.
3. **O&M costes** – estos son gastos permanentes y se miden en \$/año o \$/MWh.
4. **Costes cualitativos** – como evidenciado en el paso 4, son de difícil cuantificación, pero de gran importancia por el análisis. Incluyen los riesgos asociados con los sobrecostes relativos a un rendimiento técnico insuficiente, al tiempo de gestión de la red y a otros factores de difícil cuantificación, pero de gran importancia.

La Tabla 4 evidencia los costes iniciales y de O&M para cada tecnología analizada.

Paso 6: Relacionar costes con beneficios

Después de haber estimado costes y beneficios, es necesario compararlos para tener una visión general del proyecto y su rentabilidad. La metodología EPRI nos propone 4 diferentes métodos para la comparación. Estos métodos son evidenciados a continuación:

1. **Comparación anual** – Se consideran los costes y los beneficios de año en año para efectuar una comparación anual. Este método es muy útil para identificar en que años los costes sobrepasan los beneficios y viceversa. [13]
2. **Comparación acumulativa** – Este método considera los costes y los beneficios acumulados con el tiempo. Esta metodología nos ayuda en la identificación del punto de equilibrio entre costes y beneficios. [13]

3. ***Net Present Value*** – Este método consiste en la estimación del valor actual neto total del proyecto de un determinado número de flujos de caja futuro consecuencia de una inversión. El valor actual neto representa el valor total descontado del proyecto, o sea, la cantidad total por la cual los beneficios exceden los costes después de contabilizar el valor temporal del dinero. [6]
4. **Ratio coste-beneficio** – el valor del proyecto se puede evaluar mediante la ratio coste beneficio. Si el valor de la ratio es mayor de 1, el proyecto es rentable. Si es menor de 1, no lo es.

Paso 7: Análisis de sensibilidad

Una vez obtenido el resultado final es útil volver para efectuar un análisis de sensibilidad que evalúe como varía el resultado al variar de la hipótesis. Se toman en consideración las hipótesis que tienen un fuerte impacto con relación a los resultados y que sean, al mismo tiempo, difícilmente cuantificables. La variación de las hipótesis puede determinar la rentabilidad o la non rentabilidad del proyecto. La visión del proyecto desde el punto de vista del usuario o de la empresa de servicios públicos puede determinar que esto se considere rentable o menos. La conclusión depende de que valores y de que perspectiva deseen adoptar los responsables de la toma de decisiones.

4. Smart Contract y Blockchain technology

En este capítulo se propone describir dos tecnologías que se están desarrollando rápidamente también en el campo energético: *Blockchain* y *Smart Contract*. Estos dos métodos pueden revolucionar el mercado energético introduciendo importantes beneficios para todos los diferentes *stakeholders*. Al ser dos tecnologías actuales y potencialmente muy impactantes se ha pensado dedicar un entero capítulo para una descripción atenta de todos los aspectos relativos a su instalación. En este capítulo se propone la agregación de estas técnicas a la metodología presentada en el capítulo precedente para mitigar problemas comunes a los países en vías de desarrollo y la consiguiente evaluación de todos los aspectos involucrados en la implementación de las tecnologías.

4.1. ¿Qué son? ¿Cómo funcionan?

La tecnología *Blockchain*, en español “cadena de bloques”, se puede entender como un registro, distribuido y descentralizado, que permite, si combinado con un sistema de validación de transacciones digitales (*Smart Contract*), la transferencia de recursos *peer-to-peer* sin la necesidad de intermediarios. Todos los participantes pueden escribir y ver el registro, pero ninguno de ellos puede cambiar las reglas de administración. Este registro está sincronizado en tiempo real con una comunidad de individuos para que se validen las transferencias. Esta sincronización evita que los usuarios publiquen transacciones inválidas en la cadena de bloques, ya que los demás componentes de la comunidad detectarán la transacción no válida y la anularán. Para mantener un sistema seguro, la tecnología depende de un sistema sofisticado de algoritmos criptográficos. La criptografía es usada para proteger la identidad de los participantes, mantener las transacciones privadas y confirmar su autenticidad. Los componentes aprueban una determinada transacción utilizando una clave criptográfica de manera que se asegure que cada individuo haya validado personalmente esta y, por lo tanto, evitando que un tercero se haga pasar por uno de los participantes. Luego, la transacción se codifica de manera que, tanto las firmas como los contenidos, estén todos registrados para que ninguno pueda cambiar nada sin causar que otros rechacen la transacción. Las varias transacciones se agregan en un bloque que hace referencia al anterior por medio de su firma criptográfica.

4.2. Categorías de Blockchain

La *Blockchain* permite transacciones de gran confianza sin la necesidad de intermediarios ya que otras partes verifican y eventualmente validan cada transacción. Con relación al uso de la tecnología se pueden distinguir tres tipologías de *Blockchain*: pública, privada y bajo autorización.

- i.* **Blockchain pública** – la participación es abierta y tiene un código de dominio público que puede ser usado. Cualquiera persona puede unirse y ser parte en las actividades de la *Blockchain*. Cada usuario puede leer, escribir, verificar las actividades en curso en la *Blockchain* manteniendo su natura pública y autónoma. Cada usuario genera un par de claves: una secreta y otra pública. Si un segundo usuario quiere compartir informaciones con el primero, puede firmar un documento con la clave pública del primero que lo encriptará de manera que solo la clave privada del primer usuario pueda abrirlo. En cambio, el primer usuario puede firmar un documento con su clave privada. Este documento puede ser descifrado solo por medio de la clave pública correspondiente, que establece que este esté firmado por el primer usuario. [14]
- ii.* **Blockchain privada** – su composición está controlada y permitida solo a miembros de confianza para intercambiar informaciones confidenciales. Los participantes se pueden unir solo por medio de una invitación autentica y verificada. Este tipo de *Blockchain* no es realmente descentralizado y opera como un registro cerrado y seguro que se basa en conceptos de criptografía.
- iii.* **Blockchain bajo autorización** – esta categoría es una mezcla entre la pública y la privada. Regula el control que cada individuo puede tener dentro de su red después de una verificación respecto a su identidad. Su código central puede ser o menos una fuente abierta. Esta tipología está administrada por una sola entidad y está configurada para limitar el acceso solo a usuarios aprobados. Los administradores, por tanto, tienen derecho a controlar el acceso y a requerir un mayor grado de autenticación. [14]

4.3. *Smart Contract*

El concepto de “contrato inteligente” conocido como *Smart Contract* (SC), no es necesariamente conectado con la *blockchain*. Generalmente, uno SC tiene muchos beneficios en comparación con un contrato tradicional. La natura digital del contrato asegura que tengamos un solo contrato y que sea una versión final y definitiva, diferentemente de los contratos de papel que pueden ser destruidos o existir en varias copias. [14]

El *Smart Contract* es una fuerte prueba para demostrar lo que las partes estaban aceptando a la hora de firmar el contrato. A pesar de que la participación humana sea necesaria para la definición del contrato y para el ingreso del código, estos se ejecutan de manera automática y no sufren de retrasos por problemas administrativos o de terceros.

Un contrato inteligente en *blockchain* es un contrato entre dos o más partes que se almacena y se ejecuta digitalmente en *blockchain* usando un código. La *blockchain* se considera una plataforma ideal para contratos inteligentes al proporcionar un entorno seguro para transacciones de valor y manteniendo un historial de transacciones detallado e inmutable. [14]

Para mantener un registro de las transacciones y verificar la identidad de las partes del contrato, todas las acciones de cada participante a la *blockchain* tienen que ser configuradas por medio de la propia clave criptográfica. Una vez que se valida la transacción, esta se agrega como un bloque de múltiples otras transacciones a la cadena de bloques de las transacciones anteriores. Estos bloques luego forman parte de un registro inmutable y si una parte desea cancelar una transacción, en lugar de eliminar ese bloque, se formará una nueva transacción y se devolverá el capital correspondiente.

4.4. *Energy based blockchain*

El uso de la *blockchain* en el mercado energético se remonta al año 2014 en el cual, por primera vez se introdujo una moneda virtual para valorar la producción de energía procedente por recursos renovables de acuerdo con las informaciones en tiempo real, proporcionadas por medidores inteligentes, sobre la producción y el consumo. [15]

La integración de una cantidad siempre mayor de EERR es uno de los mayores desafíos en el campo de la informática energética. Este nuevo concepto de producción de energía modifica el actual mercado energético local que tiene que integrar los sistemas renovables en el sistema energético. En esta visión todos los consumidores son también productores de energía y pueden intercambiar energía dentro de la propia comunidad, proporcionando un servicio de precio en tiempo real e intentando balancear demanda y oferta.

La industria energética está desarrollando nuevos modelos y mecanismos para entregar servicios a los usuarios, que al mismo tiempo buscan nuevos recursos energéticos. Los *Smart Contract*, si aplicados a la esfera de la industria energética, pueden ayudar en el desarrollo de dos elementos de la RI: los medidores inteligentes y las microrredes. [14]

i. Medidores inteligentes

Los medidores inteligentes, diferentemente de los tradicionales, utilizan la comunicación inalámbrica para transmitir el consumo de energía y proveer a una facturación más precisa. Para los países en vías de desarrollo, el pago de la energía puede ser más complicado que en los países desarrollados. En

estos, las empresas de SP necesitan de identificaciones, número de seguridad social, cuenta bancaria etc. Para solucionar este problema se considera una solución ya muy utilizada para pequeñas instalaciones de paneles fotovoltaicos en la África sub-Sahariana, el *pay-as-you-go system*, en español el pago por uso. Los usuarios efectúan los pagos por medio de tarjetas prepagadas recargables sin necesidad de proporcionar datos que, por ejemplo, en múltiples áreas de los países en vías de desarrollo son imposibles de encontrar.

Los contratos inteligentes basados en *Blockchain* pueden resolver algunos problemas de seguridad, permitir pagos más rápidos y reforzar el uso de medidores inteligentes de prepago. En lugar de confiar en tarjetas de prepago que hay que recargar en una tienda determinada, con el conjunto de contratos inteligentes en la *blockchain* y medidores inteligentes, los usuarios pueden gestionar los pagos de manera que se realicen automáticamente según la estructura previamente acordada. Además, se podría organizar el contrato en coordinación con el *Renewable Resource Forecasting*. En un sistema energético alimentado por fuentes renovables la previsión meteorológica puede determinar un aumento o una disminución en el pago de la energía. Si, por ejemplo, se prevé que habrá días nublados o con mucho sol, el contrato agregará o quitará automáticamente dinero a la cuenta del consumidor según es precio de producción y el uso esperado. *Blockchain technology* ofrece beneficios de mayor transparencia para todos los participantes y una mayor confianza ya que no se pueden cambiar las reglas unilateralmente. Además, es tener un registro electrónico inmutable es garantía de seguridad para robos de energía y consecuentes sobrecargas en la facturación. Si un usuario sospecha un robo energético puede confrontar su consumo a su histórico o al promedio de sus vecinos para demostrar su inocencia. Gracias a estos beneficios se puede llegar a transmitir energía a personas que necesitan más flexibilidad o que tienen dificultades con los requisitos tradicionales.

ii. Micro redes

Las micro-redes son un área de innovación en la industria eléctrica. [14] Como visto en el capítulo 1, la mayor cantidad de energía producida por los países en vías de desarrollo procede por centrales de carbón, gas y petróleo. La generación es centralizada, o sea, hay grandes centrales de producción que generan energía y que luego la transmiten por líneas de alta tensión a las varias subestaciones que la transforman hasta que llegue a la red de distribución o de baja tensión. Este modelo centralizado lleva consigo muchos problemas con respecto a la fiabilidad de suministro, a las pérdidas y al impacto ambiental. Si, por ejemplo, pasase un fallo en una central que entrega energía a una comunidad, esta se encontraría de repente sin electricidad. En contrario, las micro-redes, aprovechan de múltiples fuentes de generación y permiten a los usuarios una gestión amplia de la energía producida. Los

usuarios son al mismo tiempo productores y consumidores de energía. Ellos pueden producir y vender la energía eléctrica no consumida obtenida principalmente por medio de fuentes renovables. Además, las micro-redes presentan un sistema de respaldo para eventuales problemas relativos a condiciones meteorológicas o a fallos en la red.

Las micro-redes pueden extender el acceso a la electricidad a comunidades rurales no conectadas a la red en los países en vías de desarrollo. En esta visión la *Blockchain Technology* con los *Smart Contract* pueden mejorar las características básicas de las micro-redes. Estos pueden permitir a los usuarios de vender la energía sobre producida de manera automática a los demás participantes al contrato de la micro-red. Por ejemplo, si consideramos dos viviendas una con paneles solares fotovoltaicos y la otra sin, la energía en exceso producida por la primera puede ser vendida de manera automática a la segunda determinando un uso menor de la energía sacada por la red central.

Facilitar la venta de la energía en exceso reduce el estrés en la red, previniendo las caídas de tensión en momentos de demanda elevada. [14]

4.5. *Smarter Energy Grid*

Como evidenciado en los párrafos precedentes la *Blockchain Technology* y los *Smart Contract*, pueden jugar un papel importante en la facilitación de las comunicaciones, transacciones y seguridad de todos los *stakeholders* involucrados en un sistema de RI. Este sistema, llamado *Smarter Energy Grid* (red más inteligente), permite la creación de un mercado energético descentralizado que puede invertir en las fuentes distribuidas, mientras redistribuye electricidad a los nuevos *stakeholders*,

Desde el punto de vista del negocio, la *Smarter Energy Grid* incrementa la seguridad en las transacciones y los pagos entre millones de usuarios. En este escenario la natura de la *Blockchain* permite a los mismos usuarios de vender energía sin problemas a los vecinos. La posibilidad que cada usuario pueda realizar transacciones en los mercados energéticos conduce hacia tecnologías distribuidas. Estas incluyen dispositivos inteligentes, recursos energéticos de generación y almacenamiento, vehículos eléctricos (en áreas urbanas) etc. Esta transformación digital tendrá un impacto positivo al crecer de la fiabilidad y de la eficiencia de la red, que son consecuencias de una regulación entre demanda y oferta, de una adaptación del precio de la energía en tiempo real y de una reducción en el coste de las O&M y en la construcción de infraestructuras de T&D.

Para un control remoto e instantáneo de los parámetros relativos a la RI los investigadores de [16] proponen el uso de una aplicación para móvil: la “*Blockchain SEG Application*” (SEG-Smart Energy Grid). La aplicación consta de 4 funciones principales.

- **Monitoreo de la actividad:** el usuario puede ver en tiempo real varios parámetros como el consumo de energía instantáneo, la energía producida por el sistema fotovoltaico, la energía absorbida por la micro-red y las tendencias en el tiempo.
- **Funcionalidad de la planta:** permite a los usuarios de geolocalizar su sistema en la micro-red, obtener sus características técnicas y detectar la presencia de fallos.
- **Blockchain:** por medio de esta funcionalidad el usuario puede ver la cantidad de energía almacenada, ver el precio de venta de la energía en tiempo real, indicar la cantidad de energía para vender y definir todas las características para efectuar la transacción. Una vez efectuada los parámetros serán guardados en el registro principal.
- **Archivo:** con esta funcionalidad el usuario puede consultar los parámetros cotidiano del propio sistema y los datos de venta de energía.

4.6. Problemas energéticos en los países en vías de desarrollo

Los países en vías de desarrollo sufren de múltiples problemas relativos a los varios ámbitos de la vida cotidiana. Estas dificultades están relacionadas entre ellas y, por cierto, el desarrollo energético es uno de estas. Además, el desarrollo energético se puede considerar como la clave para conseguir los principales objetivos sostenibles en los países en vías de desarrollo.

Antes de analizar los impactos que puede proporcionar la electrificación de las áreas no electrificadas por medio de RI en conjunto con la tecnología *Blockchain* y *Smart Contract*, resulta importante conocer los principales problemas energéticos en los países en vías de desarrollo para poder estimar como estas tecnologías pueden ayudar en su resolución.

Analizando la situación energética de los países en vías de desarrollo sobresale que, a pesar de las distancias físicas y de las diferencias socioculturales, los problemas son comunes. Los mayores problemas con relación al suministro energético en estos países se resumen en una categoría: Seguridad y Fiabilidad.

Dentro de la categoría de Seguridad y Fiabilidad, se encuentran muchos de los problemas típicos de una instalación en los países en vías de desarrollo, como: robo de energía, apagones, caídas de tensión y pérdidas eléctricas. En la Tabla 8 se observan los datos relativos a los problemas energéticos mencionados en los países en vías de desarrollo. Con la edificación de una red “tradicional” la

resolución de estos problemas resulta difícil e ineficaz. Para las RI, por el contrario, la instalación de determinados dispositivos y el uso de técnicas específicas ayudan en la detección y en la resolución de estos asuntos. La agregación de las tecnologías *Blockchain* y *Smart Contract*, refuerzan las tecnologías inteligentes en la ejecución de sus funciones. Como evidenciado en el capítulo 3, a la hora de elegir los elementos para una instalación de RI es importante relacionar las tecnologías con las respectivas funciones que realizan y luego las mismas funciones con los beneficios que llevan.

País	Empresas que han experimentado pérdidas a causa de robo y vandalismo (% de empresas)	Pérdidas en la T&D (% de output)	Valor perdido debido a apagones (% de las ventas de las empresas afectadas)	Apagones en un mes típico (número)
África sub-Sahariana	24	12	8.3	8.5
Brasil	-	16	-	-
India	-	19	-	-
Asia del sur	10	19	10.9	25.5
América latina	25	16	1.7	2.0

Tabla 8: Problemas energéticos países en vías de desarrollo. Fuente: worldbank.org

4.7. Seguridad y Fiabilidad

En el párrafo anterior se ha evidenciado la clase principal que comprende los principales problemas de instalación de redes en países en vías de desarrollo. En relación con la seguridad se destaca el robo de energía que incluye tanto los países del área BRIC como los de la África sub-Sahariana y de la Asia meridional. Como evidenciado en un estudio del *Northeast group*, en el mundo cada año se gastan 96 mil millones de dólares por pérdidas no técnicas, entre las cuales el robo energético tiene una importancia relevante. El fenómeno del robo de energía es muy vario y se realiza en los medidores, transformadores y en las líneas. Algunos de estos son evidenciados en la siguiente lista:

- Manipulación o *by-pass* de medidores
- Daño o sustracción de cables de los medidores o subterráneos
- Daño de transformadores
- Acceso ilegal a las líneas aéreas de baja tensión
- Irregularidades en la facturación hechas por los lectores de medidores
- Facturas no pagadas por clientes individuales, empresas públicas y privadas [17]

Para solucionar el robo energético nos ayuda la tecnología AMI. Esta, utilizando medidores inteligentes capaces de coleccionar datos sobre el flujo bidireccional de energía, detecta de manera sencilla el robo y su ubicación. Además, la implementación propuesta de *Blockchain* y *Smart Contract*, aumenta considerablemente el tema de la seguridad. Al tener un sistema de contratos inmodificable, regulado por claves criptográficas que tiene en cuenta de todo el histórico tanto del usuario como de los participantes a una micro red, la detección de eventuales robos resulta inmediata y sencilla. En países en vías de desarrollo, en los cuales, como dicho, la creación de micro redes representa la solución más viable y que mejor se adapta a las exigencias tanto locales como mundiales, agregar estas tecnologías informáticas encarna la mejor medida para solucionar el problema del robo energético.

En la evaluación de las pérdidas no técnicas resultan de gran impacto los apagones, las caídas de tensión y las pérdidas eléctricas. Estos tres inconvenientes se refieren más que a la seguridad a la categoría de la Fiabilidad de la red. Algunas tecnologías de RI ayudan en la resolución de estos asuntos que, no solo tienen un impacto económico tanto para las empresas de SP como para los usuarios, sino también tienen un impacto importante sobre la sociedad en general. En el sistema eléctrico de los países en vías de desarrollo estas condiciones son “normales” y dispositivos como el AMI *Smart Meter* y técnicas como *Demand Rensponse* y *Distribution Automatation* solucionan de manera sencilla las condiciones de acceso a la energía.

También en este caso, la agregación de *Blockchain Technology* y *Smart Contract* nos proporcionan mejoras en la resolución del problema. Las características propias de los SC permiten de poder efectuar acuerdos entre los usuarios y las empresas de SP para regular el precio de la energía con relación a eventuales problemas de fiabilidad.

Los SC pueden definir la flexibilidad energética prevista para cada productor/consumidor que participa en programas DR para garantizar el equilibrio entre demanda y producción. El contrato puede describir el comportamiento de los usuarios durante los eventos de DR o incluso pueden concordar varias restricciones para mantener la estabilidad y confiabilidad de la red. Estos contratos se registran en la *Blockchain* y se activan por medio de nuevas transacciones energéticas, los usuarios después de haber actualizado su estado en función de los resultados obtenidos una vez ejecutado el *Smart Contract*, validan las nuevas transacciones, las añaden al bloque y las transmiten a los demás usuarios de la red. [18]

4.8. Beneficios e impactos

Como se puede apreciar en los capítulos anteriores, la clave para evaluar la viabilidad de un proyecto es la cuantificación de los beneficios. Además, se ha resaltado la función de impactos no fácilmente cuantificables que son objeto del análisis cualitativo. Como visto en el capítulo 3.3., dividimos los beneficios en 4 categorías:

- Económicos
- Fiabilidad y calidad de potencia
- Ambientales
- Seguridad y estabilidad

Para lo que se refiere al punto 2 y al punto 4 se ha hablado en el párrafo 4.6. de este capítulo. A continuación, se efectúa una evaluación de los beneficios y los impactos económicos, ambientales y sociales.

4.9. Beneficios económicos, ambientales e impactos sociales

Desde el punto de vista económico el uso de la *Blockchain Technology* y *Smart Contract* lleva consigo beneficios y también costes. Los costes para la programación de SC y *Blockchain* son fuertemente dependientes del programador. Se estima que el coste para el desarrollo de un SC básico sin complejidades es aproximadamente de 7,000 \$. El coste de los SC es uno de los obstáculos para la agregación de esta tecnología a los sistemas de RI. La asociación sin ánimo de lucro iOlite nos proporciona una solución rentable por medio del *Fast Adaptation Engine* (FAE). El FAE es una herramienta capaz escribir SC adaptando cualquier lenguaje de input tanto de programación como no de manera gratuita. A pesar de que sea gratuito, fomenta la colaboración con programadores para verificar el contrato y para optimizar las funciones del contrato. Los programadores reciben compensaciones en forma de fichas cada vez que verifican un SC. [19]

Los beneficios económicos son relacionados a las características propias de las dos tecnologías consideradas. Un mejoramiento en el uso de la energía reduce la adquisición de dispositivos con consecuentes ahorros en la instalación, en la construcción de infraestructuras y en las emisiones de contaminantes en todas las etapas del análisis de ciclo de vida. La flexibilidad de los SC permite un ahorro en múltiples ámbitos que depende de los acuerdos entre los varios usuarios y entre estos y las empresas de SP. Por ejemplo, se pueden acordar incentivos para el consumo de energía en determinadas horas del día o por algunas fuentes de producción.

Los beneficios ambientales son fuertemente relacionados con los evidenciados precedentemente. La reducción de emisiones de contaminantes puede ser también objeto de objetivos de SC, además de un ahorro en el coste de gases de efecto invernadero. Lo que se destaca mucho son los impactos sociales que puede tener la implementación de dichas tecnologías que se adaptan a las exigencias de los países en vías de desarrollo. Para que un proyecto de cooperación funcione es necesario que la comunidad autóctona sea parte integrante del funcionamiento de las instalaciones. El concepto de comunidad, en la cual todos los habitantes participan de manera activa a la instalación y a la manutención de las tecnologías y de las infraestructuras se revela fundamental para el éxito del proyecto. Además, la adaptación del proyecto a las necesidades de los autóctonos es uno de los aspectos fundamentales para que se tenga un resultado duradero. El uso de la *Blockchain Technology* y de los SC se ajusta perfectamente a estas características. La ductilidad de estas técnicas permite que todos los requisitos mencionados se puedan satisfacer perfectamente llevando resultados relevantes en el proyecto. El impacto social no se puede monetizar fácilmente, pero lleva mejoramientos secundarios a la comunidad. Mantener autónomamente el sistema prevé cursos de formación que mejoren el nivel de aprendizaje de los habitantes locales. Esto es uno de los efectos que puede generar en el tiempo significativos avance en el nivel de instrucción y aumentar la calidad de la vida.

4.10. *Blockchain y Smart Contract en el CBA*

Por supuesto, la agregación de la tecnología de *Blockchain* y *Smart Contract* lleva consigo un incremento tanto en los beneficios y en los impactos como en los costes. Por lo tanto, es posible incorporar en la metodología presentada en el capítulo 3 los dos elementos considerados para evaluar su empleo. Primero hay que añadir en el paso 2 las tecnologías de *Blockchain* y *Smart contract* y relacionarlas con las funciones propuestas, como evidenciado en la Tabla 9.

Luego se siguen los pasos propuestos en la metodología agregando en la cuantificación de costes y beneficios los respectivos parámetros estimados.

Una vez relacionadas las funciones con las tecnologías se siguen los pasos ilustrados en la evaluación hasta la relación de los costes con los beneficios. Los beneficios se pueden cuantificar con relación a los aspectos evidenciados precedentemente y los costes son fuertemente dependientes del nivel de complejidad de la programación, aunque, como visto, existan algunas herramientas que reducen considerablemente su impacto.

Funciones	<i>Blockchain y Smart contract</i>
Detección, aislamiento y reparación fallos	
Control flujos potencia bidireccionales	
Volt-VAR control	
Diagnosis y notificación condiciones dispositivos	
Flexibilidad red, GD y almacenamiento	X
Control frecuencia	
Optimización uso energía para los usuarios	X
Control EERR	
Informaciones recursos energéticos	X
Suavizamiento curvas picos de carga	X

Tabla 9: Relación funciones con Blockchain y Smart Contract

5. Conclusiones y trabajos futuros

El estudio nos proporciona una metodología que evalúe los proyectos de Redes Inteligentes en los países en vías de desarrollo. Con anterioridad al planteamiento de la metodología se ha efectuado un enfoque con relación a la situación energética de los países en vías de desarrollo. Primero se ha centrado el problema en la accesibilidad a la red eléctrica, en las funciones y, por tanto, en los objetivos que puede facilitar la instalación de sistemas de RI. Luego se ha analizado la situación energética presente y futura de dos categorías de países en vías de desarrollo: por una parte, la África sub-Sahariana y por los otros países como India, China y Brasil que se consideran en vías de desarrollo, aunque tengan un nivel elevado de electrificación. Una vez destacados los países en los cuales se podría efectuar una instalación de RI se ha efectuado un análisis relativo al objetivo del estudio y a las directrices necesarias para una visión global del proyecto. Este análisis nos proporciona el escenario en el cual vamos a efectuar la instalación y los aspectos que afectan las tecnologías de RI. Estos aspectos son reunidos en 4 categorías: económicos, sociales, ambientales y tecnológicos. En la evaluación que se ha efectuado se destaca la importancia del aspecto social, intentando adaptar lo más posible el proyecto a las exigencias de todos los posibles *stakeholders*. Terminada la fase preliminar del estudio se pasa a la realización de la metodología. Esta es una ejemplificación de la metodología EPRI adaptada a los países en vías de desarrollo. Las funciones, las tecnologías y los beneficios son adecuados a las principales necesidades de los países en vías de desarrollo y son relacionados entre ellos en los pasos de la metodología. Se agrega, además, un análisis de sensibilidad para poder evaluar como la variación de determinadas hipótesis puede afectar el resultado final. Finalmente se propone la agregación de las tecnologías *Blockchain* y *Smart Contract* para aportar ulteriores beneficios al uso de las Redes Inteligentes. Se evidencia como estas tecnologías, si usadas correctamente, pueden llevar mejoras sobre todo en las etapas de seguridad y fiabilidad de la red, que se destacan como dos de los mayores problemas de los países en vías de desarrollo.

Se propone por trabajos futuros una estimación detallada de costes y beneficios de las tecnologías de *Blockchain* y *Smart Contract* para que se puedan incluir en la metodología como parte de la evaluación. La evaluación de RI en países en vías de desarrollo tendrá que considerar no solo los aspectos cualitativos y cuantitativos de la evaluación sino también las últimas tecnologías informáticas adaptadas al ámbito energético de acuerdo con los desafíos mundiales de incremento de las EERR, eficiencia energética y electrificación total.

Anexo I

Ghana Case Study: Demand Response

El caso de estudio aplica la metodología a un hipotético proyecto de *Demand Response* en Ghana. El Ghana es un país de la África sub-Sahariana que tiene como mayores problemas energético las pérdidas energéticas, sobre todo en la fase de distribución, y los apagones. La implementación de la técnica DR puede introducir importantes beneficios e impactos para todos los usuarios. Reducir las pérdidas y los apagones resultan ser problemas energéticos típicos en los países en vías de desarrollo. Se elige aplicar esta técnica para su funcionalidad y su coste limitado con respecto a los demás métodos propuestos. Se propone en una segunda fase de aplicar las tecnologías *Blockchain* y *Smart Contract* al caso evidenciado una vez obtenidos más datos respecto a la cuantificación de los costes y los beneficios relativos. Entre los beneficios que se relacionan con el uso de la técnica DR hay también la reducción de contaminantes (CO₂) y la reducción en el coste para los usuarios. Estos dos aspectos afectan a toda la sociedad y en especial manera a los usuarios finales. De acuerdo con las tendencias mundiales de reducción de las emisiones de contaminantes es necesario que al mismo tiempo el país comience un camino hacia un incremento de producción por fuentes renovables. En este sentido el gobierno está lanzando proyectos como el *MDA Solar Rooftop Programme* que incrementará notablemente el uso de energía solar fotovoltaica en el país que de momento representa el 1% de la capacidad instalada.

Desde el punto de vista social el Ghana se destaca como país adaptado para efectuar una instalación de Redes Inteligentes también gracias a su nivel limitado de riesgo proporcionado en el *Fragile State Index*. Este es un parámetro importante a la hora de efectuar un proyecto de Redes Inteligentes que nos da una idea del contexto social del país. Además, se puede apreciar como en las proyecciones los países vecinos al Ghana (Costa de Marfil, Togo, Burkina Faso) tendrán mejoramientos importantes en los próximos 10 años. Estas condiciones son favorables para el desarrollo de un sistema de Red Inteligente que considere también interconexiones entre los países vecinos para conseguir un alto nivel de estabilidad.

El caso de estudio reportado se propone como un ejemplo que ilustre el funcionamiento de la metodología. No se considera, por tanto, un informe detallado, puesto que se han hecho algunas estimaciones debidas a una escasez de datos. No se incluye además el uso de *Blockchain* y *Smart Contract* que queda como propuesta para trabajos futuros.

Paso 1: Definición del proyecto

En esta fase se definen los objetivos del proyecto y se efectúa un análisis del país y de sus características. Como evidenciado anteriormente se propone la instalación de la tecnología DR al contexto energético del Ghana. Este país ha sido elegido por sus necesidades a nivel eléctrico y por sus características sociales y culturales. Se considera como uno de los países más adecuados a la instalación de sistemas inteligentes.

A continuación, se evidencian las características energéticas del país y las propuestas elaboradas:

- **Capacidad instalada:** 4398.5 MW
- **Energía Generada:** 11.09 TWh
- **Energía Consumida:** 8.38 TWh
- **Energía Consumida per cápita:** 304.62 kWh
- **Demanda Pico:** 2192 MW
- **Pérdidas en T&D:** 23% (19% Distribución, 4% Transmisión)
- **Mix Energético:**
 - **Hidráulica:** 39.9%
 - **Térmica (Fósil):** 59.9%
 - **Fotovoltaica:** 0.2%
- **Coste energía 2018:** 0.13-0.15 \$/kWh
- **Emisiones CO2:** 3.77 Mt
- **Acceso energía** 79.3%
 - **Rural:** 66.6%
 - **Urbano:** 89.8%
- **Venta al por mayor:** 0.05 \$/kWh
- **Venta al por menor:** 0.10 \$/kWh
- **Compañías eléctricas:**
 - **Generación:** Volta River Authority; International Plant Propagator Society
 - **Transmisión:** Grid company
 - **Distribución:** Electricity Company of Ghana (ECG); Northern Electricity Distributed company (NED co)
- **Índice de inflación anual:** 3%

Propuesta instalación red inteligente

- **Objetivo:** disminuir pérdidas energéticas, apagones, costes para los usuarios y emisiones de CO2 por medio de DR
- **Duración análisis:** 15 años
- **Usuarios involucrados:** 2 millones
- **Capacidad DR:** 110 MW
- **Stakeholders:** ECG; NED co, usuarios y sociedad en general

Paso 2: Relacionar tecnologías con funciones

De acuerdo con la metodología presentada en el capítulo 3, se evidencian a continuación las relaciones entre la tecnología *Demand Response* y las funciones desempeñadas:

Funciones	<i>Demand Response</i>
Detección, aislamiento y reparación fallos	
Control flujos potencia bidireccionales	
Volt-VAR control	
Diagnos y notificación condiciones dispositivos	
Flexibilidad red, GD y almacenamiento	X
Control frecuencia	
Optimización uso energía para los usuarios	X
Control EERR	
Informaciones recursos energéticos	
Suavizamiento curvas de carga	X

Paso 3: Relacionar Funciones con Beneficios

Se relacionan, por tanto, las funciones con los beneficios y se evidencian algunos de los beneficios cualitativos que puede desempeñar la instalación.

Beneficios	Flexibilidad red, GD y almacenamiento	Optimización uso energía para los usuarios	Suavizamiento curvas de carga
Optimización operaciones de generación			
Reducción costes de producción secundaria			
Reducción fallos en los dispositivos			
Reducción costes O&M			
Reducción robo de energía			
78Reducción pérdidas eléctricas	X		
Reducción coste de la electricidad		X	X
Reducción apagones	X		
Reducción aumentos y caídas de tensión			
Reducción emisiones de contaminantes	X		

Beneficios cualitativos: Los beneficios cualitativos que lleva una instalación de RI en países en vías de desarrollo son varios. El incremento en las habilidades de los trabajadores de las compañías de distribución involucrados en el proyecto, la responsabilización de usuarios para reducir el consumo para la creación de comunidades de usuarios (incrementando el concepto de fiabilidad entre ellos que puede llevar a una implementación futura de las tecnologías de *Blockchain* y *Smart Contract*) son algunos de estos. Además, la reducción de apagones, por ejemplo, lleva muchos beneficios, como: el incremento de las horas de estudio que determina un aumento del nivel de instrucción del país, el acceso a la energía con beneficios relacionados a mejoras en la calidad de la vida (acceso a *clean cooking*) y la consecuencial reducción de muertes prematuras por contaminación.

Paso 4: Cuantificar los beneficios

Para cuantificar los beneficios se remonta a la metodología y especialmente a la Tabla 4 que nos proporciona una estimación de los beneficios esperados para cada tecnología. Se adaptan los valores propuestos a las condiciones del país y para los datos no accesibles se efectuaron asunciones de acuerdo con valores típicos de los países en vías de desarrollo.

Reducción pérdidas:

- **Demanda:** 8.38 TWh
- **Pérdida distribución:** 19%
- **Reducción esperada:** 9%
- **Valor coste al por mayor con índice de inflación a los 15 años:** 78 \$/MWh

$$\text{Reducción pérdida: } (8.38 \text{ TWh}) * (0.19) * (0.09) = 143\,298 \text{ MWh}$$

$$\text{Beneficio: } 143298 \text{ MWh} * 78 \frac{\$}{\text{MWh}} = 11\,117\,200 \$$$

Reducción emisiones CO2:

- **Toneladas de CO2 ahorrados por MWh in Ghana:** 0.43 ton CO2/MWh
- **Coste social CO2 con índice de inflación:** 63 \$/ton CO2

$$143\,298 \text{ MWh} * 0.43 \frac{\text{tonCO}_2}{\text{MWh}} * 63 \frac{\$}{\text{tonCO}_2} = 3\,881\,900 \$$$

Reducción precio de la energía:

- **Coste al por menor:** 0.10 \$/kWh

$$143\,298 \text{ MWh} * 100 \frac{\$}{\text{MWh}} = 14\,329\,800 \$$$

Reducción apagones:

- **Reducción propuesta apagones:** 3%
- **Promedio potencia por usuario:** 1 kW
- **Value of Loast Load:** 3 \$/kWh – 4.7 \$/kWh con índice de inflación 3%
- **SAIFI:** 86 (promedio número apagones por año en Ghana)
- **SAIDI:** 144 hr/año – 1.7 horas por apagón (promedio Ghana)

$$(86) * (1.7 \text{ horas}) * \left(4.7 \frac{\$}{\text{kWh}}\right) * (1 \text{ kW}) = 687.14 \frac{\$}{\text{usuario}}$$

$$2 \text{ millones usuarios} * 687.14 = 41\,288\,400 \$$$

Paso 5: Estimación Costes

Se ha propuesta la aplicación de DR para 110 MW con un coste inicial estimado de 150 \$/kW, de acuerdo con IRENA que considera un coste de 100-250 \$/kW y de 3 \$/kW para las O&M.

$$110\,000 \text{ kW} * 150 \frac{\$}{\text{kW}} = 16\,500\,000 \$$$

$$110\,000 \text{ kW} * 3 \frac{\$}{\text{kW}} * 15(\text{años}) = 4\,950\,000 \$$$

Paso 6: Relación Costes con Beneficios

Los beneficios estimados por la reducción de apagones sufren de una fuerte incertidumbre. Aunque no se considere en la comparación entre los costes y los beneficios el proyecto es rentable:

Costes totales: 21 450 000 \$

Beneficios totales (sin reducción apagones): 29 328 900 \$

El beneficio neto es de: 7 878 900 \$

La ratio costes beneficios: 1.37

Si consideramos los beneficios relativos a la reducción de apagones obtenemos:

Costes totales: 21 450 000 \$

Beneficios totales: 70 617 300\$

Beneficio neto: 49 167 300 \$

La ratio costes beneficios: 3.29

Paso 7: Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se puede referir al beneficio causado por la reducción de los apagones. Esto representa un beneficio importante y que sufre de una fuerte incertidumbre. La variación de los parámetros hipotéticos puede llevar a una gran variación en los resultados o el conocimiento de datos reales con respecto a los KWh robados puedes determinar un cálculo más preciso y sencillo.

Referencias case study

Los datos proporcionados se han encontrado en los siguientes informes: 2018 ENERGY (SUPPLY AND DEMAND) OUTLOOK FOR GHANA – Energy Commission, Ghana; Energypedia; The Electricity Situation in Ghana: Challenges and Opportunities – Ebenezer Nyarko Kumi; Electric Company of Ghana LTD; WorldBank.org; Greenhouse Gas Emissions in Ghana – USAID; IRENA; indexmundi.com; IEA.

Referencias

- [1] World Energy Outlook 2017- International Energy Agency
- [2] Smart grid technology in developing world- Jacob R. Young, Seattle Pacific University
- [3] The present and the future of SG in developing world- M. Fadaeenejad, A.M. Saberian, Mohd. Fadaee, M.A.M. Radzi, H. Hizam, M.Z.A. AbKadir- Renewable and Sustainable Energy Reviews
- [4] Bp energy outlook
- [5] Guidelines for cost benefit analysis of smart metering deployment- Jacob R. Young Seattle Pacific University- European Commission- Joint Research Center- Institute for Energy and Transport
- [6] Guidelines for conducting a cost-benefit analysis of Smart Grid projects- Jacob R. Young Seattle Pacific University- European Commission- Joint Research Center- Institute for Energy and Transport
- [7] Smart and Just Grids: Opportunities for sub-Saharan Africa- Morgan Bazilian, Manuel Welsch, Deepak Divan, David Elzinga, Goran Strbac , Mark Howells, Lawrence Jones , Andrew Keane, Dolf Gielenh , V. S. K. Murthy Balijepalli , Abeeku Brew-Hammond , and Kandeh Yumkella
- [8] Smart Grids and renewables a cost-benefit analysis guide for developing countries-IRENA
- [9] <https://searchnetworking.techtarget.com/definition/Broadband-over-Power-Line>
- [10] https://www.smartgrid.gov/recovery_act/deployment_status/sdgp_ami_systems.html
- [11] <https://oleumtech.com/what-is-scada/>
- [12] Smart Grids and Renewables. A Guide for Effective Deployment. Ruud Kempener (IRENA), Paul Komor and Anderson Hoke (University of Colorado)
- [13] Methodological Approach for Estimating the Benefits and Costs of Smart Grid Demonstration Projects- EPRI
- [14] SMART AFTER ALL: BLOCKCHAIN, SMART CONTRACTS, PARAMETRIC INSURANCE, AND SMART ENERGY GRIDS Alan Cohn, Travis West, & Chelsea Parker* CITE AS: 1 GEO. L. TECH. REV. 273 (2017)

[15] A blockchain-based smart grid: towards sustainable local energy markets Esther Mengelkamp1 · Benedikt Notheisen1 · Carolin Beer1 · David Dauer2 · Christof Weinhardt1 Published online: 22 August 2017 © Springer-Verlag GmbH Germany 2017

[16] Smarter City: Smart Energy Grid based on Blockchain Technology- Alessandra Pieroni, Noemi Scarpato, Luca Di Nunzio, Francesca Fallucchi, Mario Raso

[17] POWER THEFT PREVENTION IN DISTRIBUTION SYSTEM USING SMART DEVICES- Thangalakshmi Prakash- International Journal of Applied Engineering Research 10(42):30841-30845 · September 2015

[18] Blockchain Based Decentralized Management of Demand Response Programs in Smart Energy Grids Claudia Pop, Tudor Cioara, Marcel Antal, Ionut Anghel, Ioan Salomie and Massimo Bertoncini

[19] <https://medium.com/@iolite/problems-costs-of-smart-contract-development-649d88eedd1f>

[20] https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-12/documents/social_cost_of_carbon_fact_sheet.pdf

[21] http://media.kentucky.com/smedia/2009/10/19/10/HiddenCosts.source.prod_affiliate.79.pdf