

## **Simulación de la operación de redes de energía inteligentes mediante modelos de demanda de potencia usando Matlab**

## **Simulação de operação de rede inteligente através de modelagem de demanda de energia usando Matlab**

DOI:10.34115/basrv6n5-004

Recebimento dos originais: 23/08/2022

Aceitação para publicação: 19/09/2022

### **Luis Daniel Ramírez Dueñas**

Maestría en Electricidad, Mención Energías Renovables y Eficiencia Energética en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Esmeraldas, Ecuador  
Institución: Pontificia Universidad Católica del Ecuador  
Dirección: Ave 12 de Octubre, 1076, Quito, 170143, Ecuador  
Correo electrónico: ldramirezd@pucese.edu.ec

### **José Luis Sampietro Saquicela**

Maestría en Electricidad, Mención Energías Renovables y Eficiencia Energética en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Esmeraldas, Ecuador  
Institución: Pontificia Universidad Católica del Ecuador  
Dirección: Ave 12 de Octubre, 1076, Quito, 170143, Ecuador  
Correo electrónico: jose.sampietro@pucese.edu.ec

### **RESUMEN**

Este artículo muestra la implementación de varias tecnologías de generación que se acomoden a las necesidades y exigencias de nuestro entorno, el uso de la energía en este contexto se vuelve indispensable por lo que se requiere desarrollar soluciones que permitan un control sostenible y a su vez permitirá brindar medios que no generen un fuerte impacto económico, social y ambiental. El desarrollo de este estudio está basado en la investigación experimental donde se emplearon datos no estandarizados de modelos de demanda de diferentes ciudades. El modelo se implementa utilizando el paquete de software MATLAB/SIMULINK. El trabajo trata de proponer un algoritmo genérico que se utiliza para maximizar la potencia generada basándose en el comportamiento dinámico, tomando como referencia un modelo donde se examina bajo diferentes condiciones de funcionamiento. En este estudio conforme a las simulaciones realizadas en base a la comparación de los modelos de demanda, permitirá adoptar sistemas de control diversos enmarcados en el desarrollo de una planeación operativa y comercial basados en modelos de optimización y eficiencia energética. Los resultados con diferentes modos de funcionamiento expusieron la utilidad de un sistema de control que permite el uso de cada fuente de generación optimizando el despacho de energía de manera controlada considerando múltiples accesos de energía, es decir que en el momento de que se presenten altas demandas en las horas picos contar con alternativas que ayuden a evitar que la generación convencional sienta ese desgaste propio de la demanda y es precisamente con el almacenamiento de energía de otras fuentes permitirá que exista un equilibrio en la demanda lo que condescenderá a tener un sistema más confiable y amigable con el medio ambiente.

**Palabras clave:** MATLAB/SIMULINK, modelos, generación, operación, demandas.

## RESUMO

Este artigo mostra a implementação de várias tecnologias de geração que acomodam as necessidades e exigências de nosso meio ambiente, o uso de energia neste contexto torna-se indispensável para que seja necessário desenvolver soluções que permitam um controle sustentável e que, por sua vez, proporcionem meios que não gerem um forte impacto econômico, social e ambiental. O desenvolvimento deste estudo é baseado em pesquisas experimentais utilizando dados não padronizados de modelos de demanda de diferentes cidades. O modelo é implementado utilizando o pacote de software MATLAB/SIMULINK. O trabalho tenta propor um algoritmo genérico que é usado para maximizar a energia gerada com base no comportamento dinâmico, tomando como referência um modelo onde é examinado sob diferentes condições de operação. Neste estudo, de acordo com as simulações realizadas com base na comparação dos modelos de demanda, permitirá a adoção de diversos sistemas de controle enquadrados no desenvolvimento do planejamento operacional e comercial baseado em modelos de otimização e eficiência energética. Os resultados com diferentes modos de operação expuseram a utilidade de um sistema de controle que permite o uso de cada fonte de geração otimizando o despacho de energia de forma controlada considerando múltiplos acessos de energia, ou seja, no momento de alta demanda nas horas de pico, para ter alternativas que ajudam a evitar que a geração convencional sinta o desgaste da demanda e é precisamente com o armazenamento de energia de outras fontes que haverá um equilíbrio na demanda que condescenderá a ter um sistema mais confiável e ambientalmente amigável.

**Palavras-chave:** MATLAB/SIMULINK, modelos, geração, operação, exigências.

## 1 INTRODUCCIÓN

El mundo actual ha requerido la implementación de varias tecnologías que se acomoden a las necesidades y exigencias del día a día, el uso de la energía en este contexto se vuelve indispensable, por lo que se requiere desarrollar, estudiar e implementar nuevos esquemas que permitan que la generación y el consumo de la energía se lo realice de manera eficiente evitando en cierto margen el uso innecesario de la misma.

El sistema eléctrico es dinámico por lo que todos los elementos que conforman una red eléctrica deben mantener cierta utilidad y que en el futuro la integración de nuevas tecnologías se adopte para asegurar un crecimiento económico equilibrado y con sostenibilidad ambiental, sin lugar a duda la energía eléctrica ha llegado a ser parte esencial de la industria, la medicina, la ciencia, el comercio, la tecnología, etc., convirtiéndose en uno de los servicios de mayor importancia para el mundo actual. Este estudio tomara como ejemplo a Ecuador, que cuenta con una infraestructura eléctrica con un crecimiento progresivo y que en un periodo de 10 años, la demanda de potencia máxima incremento de 3.052,29 MW en el 2011 a 4.089,12 MW en el 2020; lo que representó un crecimiento del 33,97%, en la actualidad cuenta con generación de fuentes

de energía renovables que hasta febrero del 2021 aporta con 5.299,09 MW de potencia nominal y 5.254,95 MW de potencia efectiva esto representa el 79,81% siendo la energía proveniente de centrales hidroeléctricas la más predominante con 24.010,39 GWh lo que representa el 97,68% de la producción de energía renovable en el país [1].

Este estudio ha sido motivado bajo la necesidad de analizar en base a resultados históricos considerando el aumento continuo de la demanda y el precio de la electricidad en el extremo del consumidor, es a partir de esos datos observar el comportamiento del perfil de demanda, considerando un esquema basado en la migración de elementos de mayor consumo en el sistema eléctrico, por ende es necesario realizar los modelos de demanda incluyendo varios escenarios (diferentes formas de generación de energía) teniendo en cuenta que la inclusión de nuevas tecnologías tendrán incidencias tanto por el crecimiento económico, como por la transformación de las sociedades hacia modelos más energointensivos [2]. Cabe señalar que esto va sumado a los problemas ambientales causados por los sistemas de generación de energía basadas en combustibles fósiles y las cuestiones relacionadas con la integración de los recursos energéticos renovables en la arquitectura de red existente [3].

El término "red inteligente" es un término que se utiliza para nombrar un sistema de suministro de energía eléctrica que fusiona ambos con tecnologías digitales y redes de transmisión para optimizar el consumo de energía, así como para abrir y poner en marcha nuevos procesos de producción y distribución de energía. Los principales factores impulsores para mejorar las redes de distribución de energía actuales se pueden clasificar en (i) mejorar la confiabilidad (disminuyendo los riesgos de apagón o apagón), eficiencia y seguridad de la red de distribución a través de acciones para disminuir la demanda pico; (ii) mayor flexibilidad para el consumo de energía; permitir que los hogares actúen como clientes de energía eléctrica (cuando la consumen) o como energía eléctrica proveedores (al producir); con respecto al primer factor de conducción, la carga total conectada a la red puede fluctuar considerablemente con el tiempo [4].

La presente investigación se la efectuará considerando el uso de la herramienta Matlab donde se analizará diferentes esquemas aplicando metodologías que son tendencias en la actualidad, la simulación de la operación de redes de energía inteligentes mediante modelos de demanda de potencia ayudará a tener una visión clara de la potencia instalada y la que se proyectará a futuro tomando en cuenta la implementación de nuevas tecnologías que aporten a tener un sistema sostenible, eficaz y confiable, a su vez permitirá brindar soluciones que no generen un fuerte impacto económico, social y

ambiental.

Estas herramientas ayudarán a analizar y evaluar la problemática del aumento de carga y de calidad de la energía todo esto enmarcado en los conceptos de eficiencia energética.

Cada día el análisis de un acertado pronóstico de energía y de potencia eléctrica se convierte en un factor relevante e importante debido a la necesidad de poder realizar la operación y programación de las unidades de generación que diariamente salen selectas para el despacho económico. Por esta razón, los diferentes operadores de red en base a este factor desarrollan una planeación operativa y comercial a partir de estos resultados [5]. Con estos antecedentes el objetivo de este artículo es utilizar alternativas mediante la simulación empleando modelos de demanda de potencia, utilizando diferentes esquemas de generación con el uso de Matlab para desarrollar soluciones que permitan un control sostenible y la solución a la problemática del aumento de carga, estabilidad y de la calidad de la energía a su vez permitirá brindar soluciones que no generen un fuerte impacto económico, social y ambiental.

Este artículo presenta en la Sección 2 las bases teóricas en la Sección 3 los trabajos relacionados conforme a la temática escogida la Sección 4 metodología aplicada considerando los esquemas o modelos de demanda definidos. Posteriormente, la sección 5 presenta los resultados que se validan con los modelos definidos para posteriormente observar la influencia de las diferentes condiciones aplicadas a estos modelos de demanda. Finalmente, la Sección 6, resumen las conclusiones y recomendaciones encontradas en el estudio propuesto.

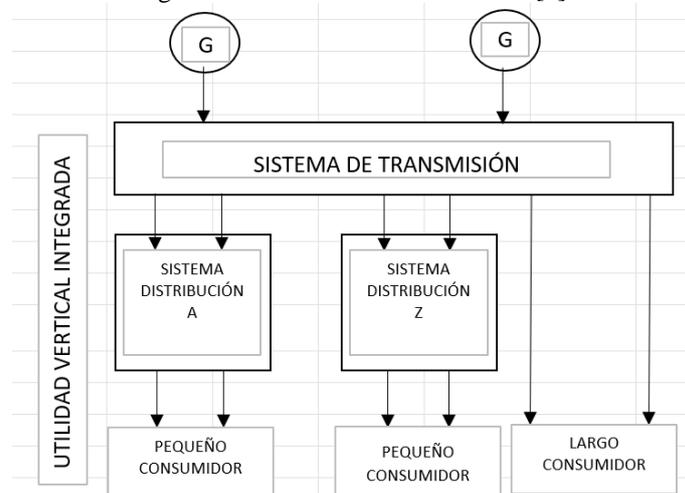
## **2 BASES TEÓRICAS**

### **2.1 REDES ELÉCTRICAS**

Actualmente, casi toda la energía eléctrica producida a nivel mundial es generada en grandes centrales, con un sistema de transporte y distribución robusto y fiable, donde el punto tenue es la baja eficiencia con grandes pérdidas energéticas en forma de calor. Los sistemas eléctricos de energía se conforman por tres componentes principales: generación, red de transporte (alta tensión) y red de distribución (media y baja tensión). La red de transporte o transmisión une la generación con las subestaciones de distribución, que proporcionan la alimentación a los usuarios a través de la red de distribución. Las interrupciones en esta conexión pueden producir una interrupción del flujo de potencia desde los generadores hacia los consumidores [6].

No obstante, las redes eléctricas existentes a pesar de haber cumplido la vigencia tecnológica todavía carecen de los dispositivos electrónicos avanzados modernos (sensores sofisticados), comunicación bidireccional, control automatizado, autorreparación y generación distribuida escalable. Los sistemas eléctricos clásicos actuales presentan ineficiencias, porque no toda la energía producida puede llegar a los centros de distribución. Se pierde algo de energía durante la transmisión. Además, la red eléctrica clásica ha utilizado una topología jerárquica, lo que puede provocar fallas en cascada y fallas en la red [7]. Se puede visualizar una estructura simplificada de los sistemas de energía clásicos como se describe en la siguiente figura 1.

Fig. 1. Sistemas eléctricos actuales [7].



El sistema de energía clásico consta de componentes de producción, transmisión y distribución. El precio final de la energía de la es fijada por quienes administran la red, y es aprobada por el regulador, que generalmente es controlado por el gobierno donde se encuentra la red eléctrica. Durante la última década, la estructura clásica de los sistemas de energía ha evolucionado para incluir a los comerciantes que ofrecen servicios financieros y de comercialización de energía, con el fin de estimular la competitividad en el mercado de la electricidad [7].

## 2.2 RED ELÉCTRICA MODERNA

Los futuros sistemas energéticos se basan en el paradigma de las redes eléctricas inteligentes. Un sistema de red eléctrica inteligente es una red eléctrica clásica que posee, además, algunos componentes eléctricos modernos avanzados, por ejemplo, sistemas de sensores, algunos actuadores y una infraestructura de comunicación. Pero esta interacción

del sistema hace que la red sea más inteligente. Sin embargo, los sistemas de redes eléctricas inteligentes a gran escala reales se consideran actualmente sistemas de energía del futuro. Las redes inteligentes tienen el potencial de optimizar la eficiencia, confiabilidad, economía y sustentabilidad de la producción, distribución y consumo de energía eléctrica. Las redes inteligentes pueden mejorar eficazmente el principio de funcionamiento de las redes de transmisión y distribución de electricidad existentes, garantizando así un alto nivel de seguridad y calidad del suministro eléctrico. La determinación a corto plazo de la producción de energía óptima de varios generadores de energía para satisfacer las demandas de carga al costo más bajo posible, sujeto a restricciones de transmisión y operativas, se conoce como Despacho Económico de Energía (EED). El despacho de energía de las redes inteligentes no se puede cumplir de manera eficiente sin aplicar un algoritmo bien definido que debe ser capaz de satisfacer las demandas de carga actuales, así como de predecir las demandas de carga futuras a corto y largo plazo. La Figura 2 muestra un ejemplo de una red inteligente a pequeña escala que involucra varias instalaciones de generación y consumidores conectados a un solo centro de control. El objetivo principal de un problema de optimización es minimizar simultáneamente los costos, riesgos y daños, y maximizar las ganancias y los ahorros [4].

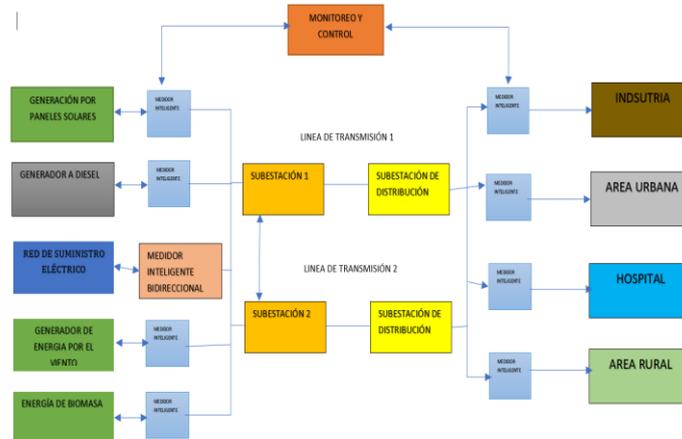
Fig. 2. Sistema de energía distribuida [7].



Una tecnología que se desarrolla para maximizar los beneficios de las empresas de servicios públicos y sus consumidores y para proporcionar los servicios de electricidad económicos y fiables por el uso eficiente de las fuentes y las herramientas inteligentes disponibles se denomina tecnología de red inteligente. Una red inteligente es una red que combina la tecnología de la información con la red del sistema eléctrico actual. Por lo tanto, es posible que las empresas de servicios públicos recopilen diversa información

eléctrica de la red eléctrica utilizando sensores inteligentes y un sistema de comunicación rápido que ayuda a equilibrar la oferta y la demanda [4]. Un modelo de una red inteligente se detalla en la Figura 3.

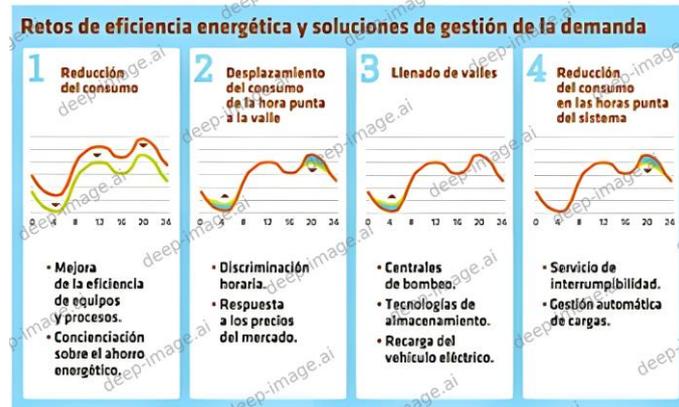
Fig. 3. Sistema de energía distribuida [4].



El potencial de la red de red inteligente es muy alto ya que la red eléctrica se vuelve compleja y sobrecargada día a día. La infraestructura se está volviendo vieja para soportar las necesidades energéticas actuales. La demanda durante las horas pico de carga es generalmente mayor que el suministro de las redes. Provoca cortes de energía, lo que realmente es motivo de preocupación. Las redes eléctricas tienen problemas en los distintos niveles de generación, transmisión y distribución. Hoy en día, la mayoría de las centrales eléctricas utilizan combustibles fósiles para la generación de electricidad. Por tanto, los retos medioambientales y económicos también están presentes en las redes eléctricas [6]. Otra alternativa relacionada con las Smart Grid son las "Micro Grids" (o microrredes), concepto en el cual la energía se genera, transmite, consume y a su vez es administrada a nivel local como en parques industriales, universidades, o urbanizaciones, y que evidentemente asumirían una integración con la red primaria operando de forma aislada o en conexión según las circunstancias. Las Smart Grids utilizarán equipos y servicios innovadores, con tecnologías de comunicación, control, seguimiento y autodiagnóstico, que ayudarán primero a (i) fortalecer y automatizar la red, mejorando la operación, los indicadores de calidad y las pérdidas que se dan comúnmente en la red, (ii) optimizar la conectividad en zonas con fuentes de energía renovable, mejorando capacidades de enlace y restando el importe de conexión de estas, (iii) desarrollar una arquitectura de producción descentralizada, que permita la operación de instalaciones más pequeñas (generación distribuida) que se adapte con el sistema, (iiii) una mejor

integración de la generación discontinua con nuevas tecnologías de almacenamiento, (iiii)promover el crecimiento del mercado de la electricidad, facilitar nuevas funciones y servicios a los comercializadores y consumidores y en última instancia llevar una correcta gestión proactiva de la demanda, permitiendo que los usuarios administren de manera más eficiente sus consumos, mejorando la eficiencia energética [8]. (ver Tabla 1):

Tabla I medidas de gestión de la demanda [8]



Cabe señalar que existen medidas de gestión de demanda que mejoran la curva de demanda, convirtiéndola en una curva más más operativa y administrativamente consistente. Al hilo de lo expuesto en el apartado anterior la Tabla 2 muestra las diferencias que introducen las Redes Inteligentes con respecto a las redes actuales [8].

Tabla II diferencias red inteligente vs red actual [8]

CARACTERISTICA	RED ACTUAL	SMART GRID
Comunicaciones	En una dirección (si existen)	Comunicación bidireccional
Participación del consumidor y Generación distribuida	Consumidores desinformados y no activos. Flujo energético unidireccional (no se genera localmente)	Incorporación masiva de generación distribuida a través de red inteligente. Participación del usuario con gran capacidad de decisión
Precio	Información limitada sobre el precio de la electricidad	Información total
Flujo de potencia	Control limitado	Control total
Gestión de la demanda	No existe gestión con dispositivos eléctricos en función de la franja horaria del día, o del estado de la red eléctrica	Incorporación en el lado del usuario de equipos eléctricos y electrodomésticos inteligentes que mejoran la eficiencia, reciben señales de precios y son capaces de seguir programas predeterminados

Inteligencia y control	No hay inteligencia	Creación de un sistema de información inteligente
Grado de automatización	Muy limitado (reservados para la Red de Transporte)	Incorporación masiva de sensores, actuadores, smart metering y esquemas de automatización en todos los niveles de red
Reposición	Basada en la Protección de dispositivos ante fallos en el sistema. Reposición manual	Reposición semiautomática y eventualmente autorrecuperación. Enfoque de prevención
Fiabilidad ante ataques y desastres naturales	Propensa a fallos y apagones	Rápida capacidad de restauración (protecciones adaptativas y creación de islas)
Calidad eléctrica	Solo se resuelven los cortes de suministro, y limitado control de calidad de onda (los huecos de tensión, flivker, ruido...)	Identificación y solución de problemas de calidad de energía. Varios tipos de tarifas en función de esta.
Optimización del transporte eléctrico	Perdida de gran cantidad de energía	Sistemas inteligentes de control que aprovechan eficientemente la capacidad de transmisión de la red
Capacidad	Pocas grandes plantas generadoras. Muchos obstáculos para la interconexión de recursos distribuidos	Alto número de dispositivos generadores y almacenadores distribuidos, que completan a las grandes plantas generadoras. Conexiones más enfocadas a energías renovables (plug&play)
Equipos	Comprobación manual de equipos	Equipos con operación remota
Vehículo eléctrico	Incorporación reciente de puntos de carga eléctrica en la red. Solo permiten recarga de batería.	Nuevas infraestructuras especializadas destinadas a la recarga y a permitir que cada vehículo se convierta en unidad generadora

### 2.3 SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

Los Sistemas de almacenamiento de energía (SAE) juegan un papel cada vez más importante en la Industria eléctrica convencional (IEC). A diferencia de otras plantas generadoras, la IEC la IEC carece por completo o en gran parte de un sistema de almacenamiento de energía. Los sistemas eléctricos tradicionales funcionan en una sola dirección, desde las grandes centrales eléctricas hasta los centros de consumo. Esto significa que la energía generada debe consumirse inmediatamente. Sin embargo, la

demanda de energía es una variable difícil de predecir y alcanza su punto máximo solo en unas pocas horas, esta fluctuación de la demanda causa pérdidas en el sistema. Almacenar la energía generada, es el primer problema que enfrentan las energías renovables, la clave para terminar con la inestabilidad en la generación de energía es incluir grandes cantidades de energía renovable y adaptarlas a los sistemas eléctricos existentes y cumplir con los acuerdos de protección climática. El reto del almacenamiento es desarrollar alternativas de gestión y a su vez igualar el flujo energético, permitiendo reducir la inestabilidad que caracterizan a las tecnologías renovables no programables y con curvas de generación no armonizadas con la demanda, como es el caso de la solar, eólica y del océano. La electricidad no se puede almacenar, para hacerlo debe transformarse en otro tipo de energía, como la mecánica (bombeo de agua), química (baterías, pila de combustible de hidrógeno) o electromagnética (supercondensadores). Acumular, es la palabra mágica que facilitará el salto hacia una economía que no dependerá de combustible fósil. Es vital para las renovables, pero no sólo eso, su desarrollo es capital también para la producción de energía convencional, permitiendo el desarrollo de redes eléctricas inteligentes, que aparten la generación del consumo para lograr un sistema más dúctil, eficaz y seguro, en el cual tenga lugar para la generación distribuida y las micro-redes [6]. La mayoría de los SAE funcionan a través de la conversión de electricidad hacia otras formas de energía, las cuales, a través de un proceso dado, pueden recuperarse en forma de electricidad.

#### 2.4 MODELOS DE DEMANDA

Hay que tomar en cuenta que la precisión de cualquier pronóstico de demanda de potencia eléctrica esta influenciada directamente por: Los datos disponibles, La metodología aplicada, y El horizonte a planificar. De manera general es posible darse cuenta de que podemos clasificar los modelos según su esencia:

- Modelos de energía total consumida: En esta categoría se incluyen los modelos en los que la variable dependiente es el consumo total de energía a lo largo de un determinado período de tiempo, el cual, frecuentemente se refiere a un año, un trimestre o un mes. La mayoría de estos modelos se fijan en una determinada unidad de consumo (demanda doméstica, comercial o industrial). En Santiago de Chile, Chile proponen usar redes neuronales para el pronóstico mensual de energía eléctrica Generada. El horizonte de predicción es de largo plazo y el error absoluto medio porcentual de  $\pm 3\%$ .

- Modelos de pico de demanda: Estos modelos tienen un considerable interés para las empresas eléctricas ya que las puntas de carga o picos de demanda constituyen el fundamento de la planificación de capacidad generadora, y del calendario futuro de mantenimiento. En el Centro Nacional de Generación (CNG) se elaboró hasta el 2006 este tipo de modelos en el departamento de estudios y se publicaban en la sección proyección de los informes anuales [Informe Anual OPSIS, 2006, pag 38]; el estudio de pronóstico de energía y potencia eléctrica del sistema eléctrico nacional contempla escenarios bajos y alto de la demanda de potencia y consumo de energía en el periodo 2005 al 2024. Por otro lado, en Taiwan, proponen usar máquinas de vector de soporte para pronosticar valores pico de demanda de potencia en un horizonte de 30 días.
- Modelos econométricos: En estos modelos la demanda futura se determina considerando la influencia de variables explicativas (PIB, intercambios económicos, número de clientes, tarifas). Generalmente este tipo de modelos suelen ser los más complejos. En Andalucía, España propone usar modelos econométricos y contrastarlos con modelos de series temporales multivariadas (suponer que la serie de demanda de potencia es función de la serie de temperatura). El horizonte de predicción que usa es de medio plazo, el error absoluto medio porcentual es de  $\pm 23\%$ .
- Modelos de demanda horaria: Los modelos de esta categoría sirven para planificar el día a día en un despacho de carga. La meta de este trabajo especial de grado es encontrar un modelo fiable que sea útil al momento de planificar los despachos de carga diario (y los esquemas de generación) para de esta forma poder elaborar los calendarios de mantenimiento preventivo. En Paraná, Brasil propone usar máquinas de vector de soporte para el pronóstico de la demanda de potencia eléctrica para el planeamiento y operación de sistemas eléctricos. El horizonte de predicción que se usa es de corto plazo y el error absoluto medio porcentual es de  $\pm 1,63\%$  para los días de semana y  $\pm 3,73\%$  para los fines de semana.
- Modelos para redespacho: Estos modelos buscan recortar el horizonte de predicción y de esta forma llevar a cabo un despacho económico en las distintas horas del día. En Quito, Ecuador propone usar Inteligencia Artificial (Razonamiento Inductivo Fuzzy -FIRY Algoritmos Evolutivos) para la reprogramación del parque hidro - térmico, con las consideraciones específicas de control de tensiones y despacho de potencia reactiva. El horizonte de predicción

que usa es a muy corto plazo. Esta metodología actúa cada vez que en el redespacho se ve un error absoluto medio porcentual del  $\pm 2\%$ . Adicionalmente para estudiar cambios de tendencia y heterocedasticidad se tomará en cuenta el trabajo de Efecto en la demanda del sistema eléctrico nacional debido a la sustitución de bombillos incandescentes por bombillos de alta eficiencia [9].

### 3 TRABAJOS RELACIONADOS

El desarrollo de la investigación planteada se ha considerado relevantes aquellos trabajos afines con la idea central de estudio “Simulación de la operación de redes de energía inteligentes mediante modelos de demanda de potencia usando herramientas de Software”. Para realizar esta investigación se acoge como referencia un determinado periodo de tiempo equivalente al lapso de (2015 - 2021). Adicionalmente, se recurrió a distintas bases documentales como Scopus, IEEE, Xplore y Google Académico, obteniendo así un total 22 documentos entre TFM, artículos científicos, y revistas de los cuales seis (6) de ellos se eligieron para el desarrollo de los antecedentes.

La primera investigación titula “Plataforma Interactiva de Simulación para Redes Eléctricas de Distribución” por J. Muñoz, H. Vargas, et al. [1] en el año 2015, presenta una aplicación computacional desarrollada en lenguaje Java, que tiene por finalidad ser una herramienta para simular redes de distribución eléctrica, abordando diferentes problemáticas propias de su proyección, planificación y operación. La metodología con la que se desarrolló esta investigación está basada en una aplicación compuesta por tres módulos, siguiendo el conocido patrón de diseño de software Modelo Vista Controlador (MVC). Dentro de las características de la aplicación desarrollada, se encuentran: el cálculo del flujo de potencia, la localización óptima de transformadores utilizando algoritmos genéticos; y la integración del middleware JADE, para trabajo con agentes de software, en particular, usados en la búsqueda de soluciones al problema de restauración de servicio en redes eléctricas de distribución. Finalmente, dado el trabajo realizado, es posible notar la gran capacidad que posee la herramienta para incorporar distintas temáticas que estén relacionadas con las redes eléctricas, en donde se requiera obtener resultados tanto eléctricos como gráficos [1]. Esta investigación se relaciona con el tema de estudio debido a que presenta una herramienta de ayuda para trabajar con temáticas orientadas a las redes eléctricas y los elementos propios que la componen lo cual permite obtener resultados cercanos a la realidad.

El segundo artículo que titula “Gestión de la demanda en las redes inteligentes. Perspectiva y control desde el usuario y la distribuidora” por S. N. Bragagnolo, J. C. Vaschetti, et al. [2] del 2020, desarrolla una manera de gestionar la demanda de acuerdo con los tipos de control existente presentando ejemplos sencillos de optimización de la demanda y así analizar un camino más viable para adoptar sistemas de control diversos. El modelo se presenta en tres subsecciones: en la primera se describe que es la gestión de la demanda, en la segunda se definen los tipos de control y en la última se clasifican las cargas y se elabora una tabla con las cargas que podrá tener cada usuario. Este enfoque es novedoso ya que se centra en la interacción usuario-distribuidor, dejando la optimización a cargo del usuario, pero permitiendo la intervención de la distribuidora por medio de la interacción, solicitando al usuario una nueva propuesta de optimización, si se lo considera necesario [2]. Este artículo tiene una relación con el tema de estudio debido a que contiene diferentes modelos de demanda adaptable y que permiten la interacción entre el usuario y el distribuidor proponiendo un control indirecto híbrido que implica una comunicación con información restringida entre los usuarios y el distribuidor.

La tercera investigación estudiada lleva por título “Supervision system for the monitoring of smart electric networks” por J. Ramos, O. Hernandez y R. C. Silverio [3] del 2019, la cual se presenta mediante una aplicación informática encargada de supervisar el monitoreo de una red inteligente en las condiciones de una infraestructura menos desarrollada y mediante el uso de software libre. La metodología que describe el artículo en mención reúne búsquedas sobre la supervisión y control de las redes inteligentes que se concentran en las áreas de la seguridad, latencia, tolerancia de fallos y los protocolos de comunicación. Como resultado del número de dispositivos conectados, el volumen de información intercambiado es cada vez mayor, creando un sistema de supervisión y control cada vez más complejo. Estos sistemas deben tener flexibilidad de administración, capacidad de crecimiento casi ilimitada y monitoreo de su flujo de datos a través de la red de comunicaciones. Se obtuvo un sistema capaz de realizar las tareas de supervisión y monitoreo de una red inteligente de estructura menos desarrollada, empleando programación abierta, a través del software libre Python [3].

Esta investigación permite tener una referencia, con posibilidades de adaptar situaciones o escenarios conforme a las necesidades planteadas, teniendo como estructura base la combinación de procesos empleando diferentes programaciones.

La cuarta investigación parte de un análisis del “Almacenamiento de energía como alternativa a la conexión a la red eléctrica” por R. De Guadalupe, N. Hernández y S.

Pineda [4] del 2018, es aquí donde las tecnologías de almacenamiento juegan un papel clave en el balance de un sistema eléctrico de potencia. La implementación de un sistema de almacenamiento presenta varias ventajas, tales como mejoras en la calidad de energía suministrada, en la autonomía de la red y en la vinculación de generación distribuida permitiendo la introducción de generación alternativa. Estos sistemas incluyen, baterías, hidrógeno, rebombeo, etc. El modelo que describe este artículo permite conocer de manera más detallada las ventajas que se obtiene con el almacenamiento de la energía misma que está ligada a las condiciones que presente la red eléctrica lo que permitiría actuar en situaciones donde la producción es mayor al consumo o viceversa lo que permite obtener de una manera más confiable mejoras en la calidad de la energía suministrada, permitirá tener una red autónoma en donde la generación distribuida será clave para la inclusión de la generación de energías alternativas. Es necesario comprender que no todo sistema de almacenamiento de energía cumple los requerimientos necesarios para todas las aplicaciones de los sistemas energéticos [4].

Para la aplicación en el estudio se considerará sistemas de almacenamiento que permitan captar flujo de energía que sea capaz de adaptarse a las exigencias de un sistema de distribución versátil ante las múltiples condiciones que se generan por razones técnicas, la cantidad de energía alimentada a la red eléctrica siempre debe permanecer en el mismo nivel de la demanda solicitada por los consumidores para prevenir apagones y daños a la red.

Otra de las propuestas recuperadas fue el trabajo “Demand-side energy simulation, assessment and optimization” por J. Qin and J. Wang [5] del 2015, este apartado trata de desarrollar un modelo de optimización de la programación de la carga para que las plantas minimicen los costes derivados del consumo de energía estos es cuando el usuario en horas picos su demanda se vuelve alta por lo que la entrada en operación de los sistemas de generación convencionales hace de que lo que se genera se entrega y no se operan a los elementos en el punto de eficiencia adecuados, pues se prioriza el tema económico. La metodología implementada en este artículo se basa en un modelo de optimización para la programación de la carga, cuyo objetivo es ahorrar el coste energético del cliente en la mayor medida posible, sin que ello afecte a la producción normal de energía [5]. Esto permitirá evaluar y diseñar un sistema basados en modelos de optimización para varios perfiles de carga que reflejen un uso eficiente de la energía tomando en cuenta muchos factores entre esos la agrupación de varios dispositivos

eléctricos, que a su vez permitirán tener un sistema más dinámico, confiable y sostenible ante las necesidades que se presenten a futuro.

Finalmente, el sexto estudio recuperado, titulado “Study on Grid Planning Method Considering Multiple Energy Access” por J. Li, M. Zhang, Z. Li, T. Zhang et al. [6] del 2018, donde hace un análisis con miras a la importancia de la transformación de la estructura energética en China. Para satisfacer la demanda precisa de la nueva energía mediante la simulación de la operación del sistema de energía, esto proporcionará la base para la simulación de la operación del sistema de energía nueva a gran escala. Teniendo en cuenta la investigación de los métodos de planificación de la red eléctrica que consideran múltiples accesos de energía, este trabajo propone un método de planificación de optimización del sistema eléctrico para la generación combinada de energía y el consumo de nueva energía a partir del almacenamiento de energía eólica y solar. Mediante la comparación y el análisis de las diferencias en las características de la carga y las características de la salida de energía, estudiamos el impacto del nuevo consumo de energía. Sobre esta base, a partir de la función objetivo de la tasa de cambio de la potencia de salida del sistema combinado de almacenamiento de energía eólica y solar, la relación de la tasa de desviación de la potencia activa, la suma de la pendiente del pico de demanda, y la tasa de fluctuación de la potencia de salida son restricciones, y se propone un plan de red de acceso multienergético. El contenido de la investigación de este trabajo tiene un importante significado como guía de ingeniería para la investigación del nuevo consumo de energía y la investigación de la planificación del sistema de energía de los sistemas de energía interconectados entre regiones en la red eléctrica real [6]. El aporte de esta investigación ayudará a centrar el estudio en mecanismos de optimización del sistema eléctrico considerando diferentes tipos de generación de energía que ayuden a tener un sistema eléctrico confiable, esto quiere decir que en el momento de que se presenten altas demandas en las horas picos contar con alternativas que ayuden a evitar que la generación convencional sienta ese desgaste propio de la demanda y es precisamente con el almacenamiento de energía de otras fuentes permitirá que exista un equilibrio en la demanda lo que condescenderá a tener un sistema más confiable y amigable con el medio ambiente.

## **4 MODELO DEL SISTEMA Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA (MATERIALES Y MÉTODOS)**

### **4.1 ASPECTOS GENERALES DE LA INVESTIGACIÓN**

El desarrollo de este estudio está basado en la investigación experimental donde se emplearon datos no estandarizados de modelos de demanda de diferentes ciudades con el uso de las herramientas de Matlab/Simulink permitiéndonos encontrar mecanismos adecuados para el desarrollo de propuestas enfocadas en mejorar el sistema eléctrico considerando el crecimiento paulatino de la demanda. De igual manera para el desarrollo de la presente investigación se utilizará la investigación aplicada, se recolectará información de las condiciones actuales de operación del sistema de distribución eléctrico considerando las ciudades que se tomen como modelo del estudio y se determinarán los requerimientos técnicos que permitan modelar la demanda ya sea por tipos de usuarios o por niveles de cobertura que ayuden a resolver la problemática del aumento de la demanda y confiabilidad del sistema considerando soluciones a corto, mediano y largo plazo. Por otro lado, la investigación se considera de tipo mixta debido a que integra un componente cualitativo y cuantitativo. Los datos que se considerarán para la realización del trabajo de investigación propuesto se establecieron dentro de un periodo no mayor a 7 meses donde se evaluaron de manera escalonada los resultados, de las simulaciones conllevaron a 3 diferentes escenarios que ayudaron a tener una mejor perspectiva para aplicación de un sistema adecuado al objetivo de estudio. Se establecieron diferentes esquemas de generación, donde se proyectó diferentes modelos de demanda que permitieron definir soluciones ante la problemática del aumento de carga esto conllevo a tener un sistema poco confiable, sostenible y con bajos índices de calidad.

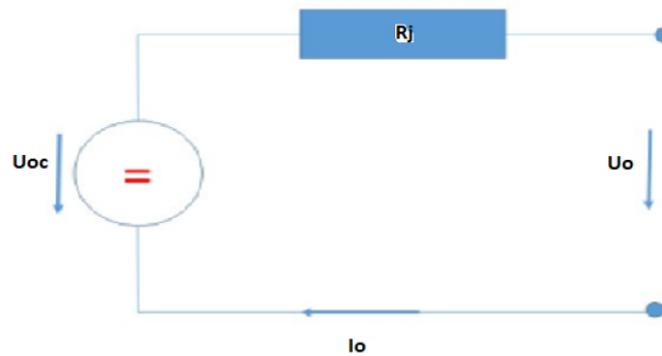
Este estudio se lo sustento mediante investigaciones bibliográfica que permitieron recopilar información adecuada basada en artículos, revistas, repositorios etc., donde detallaron de manera específica las bases conceptuales para desarrollar modelos de demanda de potencia que permitan realizar un análisis técnico basado en ejemplos aplicables al objeto de estudio. A continuación, se realiza una breve descripción de los modelos a utilizar dentro de nuestro esquema considerando las bases teóricas y matemáticas para implementarlo de manera correcta, considerando que nuestro sistema contemplara generación de diferentes fuentes como almacenamiento de energía por medio de baterías, generación por medio del sol (PF) y generación eólica.

## 4.2 MODELO DE LA BATERÍA

Las baterías electroquímicas son unos de los componentes clave en los Vehículos eléctricos (EV) y Vehículos eléctricos híbridos (HEV). Las baterías, para la gestión energética en particular, estarán caracterizadas principalmente en términos de potencia y energía. Una característica es su capacidad nominal normalmente expresada en Amperios por hora (Ah), y por el estado de carga (SOC), que representa la capacidad restante de la batería, expresada como un porcentaje de su capacidad máxima. Algunas propiedades deseables de las baterías para aplicaciones de EV y HEV son su alta densidad energética, su duración durante el ciclo, su prolongada vida útil, los bajos costos iniciales y los de reemplazo, además de su alta fiabilidad, amplia gama de temperaturas de funcionamiento y su robustez. La capacidad de una batería medida en Ah, se emplea para conocer la cantidad de corriente que puede almacenar durante la carga y devolver durante la descarga. Tenga en cuenta que cuanto más rápido se descarga la batería, más energía se pierde debido a la resistencia interna, por lo que no se puede utilizar toda la capacidad de la batería. Por lo tanto, la capacidad de carga suele estar asociada con un tiempo de descarga estándar y un voltaje final específico. De hecho, el funcionamiento de la batería se define típicamente por una cierta ventana de SOC, cuyos límites son el SOC mínimo que se puede alcanzar durante descarga y el SOC máximo que se puede alcanzar durante la carga.

En apartados como [10] se indica que la densidad energética de la batería sigue siendo de 3 a 5 veces mayor que la de un sistema de pilas de combustible. La resistencia interna es el mayor factor que limita la capacidad de carga y descarga de la batería. La resistencia tiene valores diferentes bajo condiciones de carga y descarga. La resistencia y el voltaje en circuito abierto son funciones no lineales del estado de Carga de la batería (CB). La batería puede proceder de un circuito equivalente, como el que se presenta en la Figura 4.

Fig. 4. Circuito equivalente de la batería



En este circuito, la batería está representada por una fuente de tensión de circuito abierto, en serie con una resistencia interna. Entonces, aplicando la ley de Kirchhoff para el circuito equivalente se obtiene:

$$u_b(t) = u_{oc}(t) - r_i(t) i_b(t) \quad (1)$$

donde  $u_b$  es el voltaje terminal del circuito,  $u_{oc}$  el voltaje en circuito abierto,  $r_i$  la resistencia interna y  $i_b$  la corriente terminal del circuito. El voltaje en circuito abierto es una función de la carga de la batería. Una parametrización de dicha función se propone en [11] de la siguiente manera:

$$u_{oc}(t) = k_2 SOC(t) + k_1 \quad (2)$$

donde los coeficientes  $k_1$  y  $k_2$  dependen únicamente del diseño de la batería y el número de celdas, pero no de las variables operativas, por lo que pueden considerarse como constantes con el tiempo. Existen trabajos como [12], donde además de expresarla de esta manera, distinguen aspectos de carga y descarga para la formulación. Una desventaja del modelo es que la resistencia no depende de la corriente de la batería. Sabiendo que la corriente de la batería  $i_b$  se puede determinar a partir

$$i_b(t) = \frac{P_b(t)}{u_b(t)} \quad (3)$$

donde  $P_b(t)$  es la potencia de la batería. A partir de (1), (2), (3) y (4) se puede obtener la siguiente expresión

$$u_b^2(t) - (k_2 SOC(t) + k_1) u_b(t) + P_b(t) (k_4 SOC(t) + k_3) = 0 \quad (4)$$

de donde la tensión de la batería viene dada por

$$u_b(t) = \frac{k_2 SOC(t) + k_1}{2} + \sqrt{\frac{k_2 SOC(t) + k_1}{4}} - [Pb(t)(k_4 SOC(t) + k_3)] \quad (5)$$

Existen tres formas de interconectar grupos de baterías, dependiendo del nivel de voltaje y corriente requerido y de las características de las baterías utilizadas conexión serie, paralelo o mixta serie-paralelo. Dependiendo de la configuración utilizada, aumentará el voltaje total, la capacidad o ambos. Cuando se tiene una conexión en serie, la tensión que proporciona el conjunto es igual a la suma de las tensiones. Cuando están en paralelo, la capacidad aumenta como la suma de las que se utilizan. Para tener en cuenta el número de celdas a utilizar, se puede reescribir la ecuación anterior en términos de  $r_i$  y  $u_{oc}$ , de forma que después como se muestra en la Ecuación 6:

$$u_b(t) = \frac{u_{oc}(t)}{2} + \sqrt{\frac{u_{oc}(t)}{4}} - Pb(t)r_i(t). \quad (6)$$

Cuadro 1: Parámetros de la batería.

Parámetro	Valor
$k_1$	1.2 [V]
$k_2$	0.21 [V]
$u_{cmax}$	1.55 [V]
$u_{cmin}$	0.55 [V]
$r_i$	2.2 [mΩ]
$SOC_{max}$	0.9
$SOC_{min}$	0.3
$E_{max}$	46 [Wh/Kg]
$P_{max}$	1300 [W/Kg]
$T$	-20 a 50 [° C]

En el caso de estudio de la tesis se utilizará una batería con los parámetros que se muestran en el Cuadro 1 obtenidos de [13].

#### 4.3 MODELADO Y DISEÑO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO

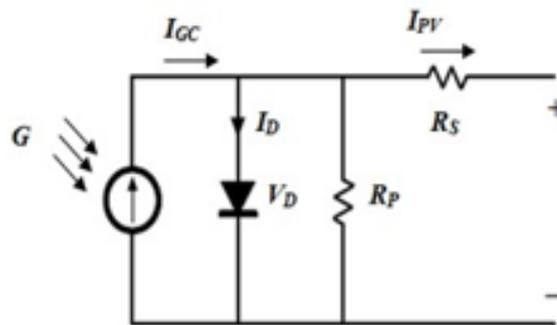
El modelo matemático general de la célula solar se ha estudiado durante las últimas tres décadas [14]. El circuito del modelo de célula solar, que consta de una fotocorriente, un diodo, una resistencia en paralelo (corriente de fuga) y una resistencia en serie, se muestra en la Figura 6. De acuerdo con el circuito de la célula fotovoltaica

que se muestra en la Fig. 5 y con las leyes del circuito de Kirchhoff, la corriente fotovoltaica puede presentarse como sigue [15]:

$$I_{pv} = I_{gc} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{eV_d}{KFT_c}\right) - 1 \right] - \frac{V_d}{R_p} \quad (7)$$

Donde  $I_{gc}$  es la corriente generada por la luz,  $I_0$  es la corriente de saturación oscura que depende de la temperatura de la célula, e es la

Fig. 5. Circuito equivalente de una célula fotovoltaica de un solo diodo



carga eléctrica =  $1,6 \times 10^{-19}$  culombios,  $K$  es la constante de Boltzmann =  $1,38 \times 10^{-23}$  J/K,  $F$  es el factor de idealización de la célula,  $T_c$  es la temperatura absoluta de la célula,  $V_d$  es la tensión del diodo y  $R_p$  es la resistencia en paralelo. La fotocorriente ( $I_{gc}$ ) depende principalmente de la irradiación solar y de la temperatura de la célula, que se describe como [15]

$$I_{gc} = [\mu_{3c}(T_c - T_r) + I_{3c}] G \quad (8)$$

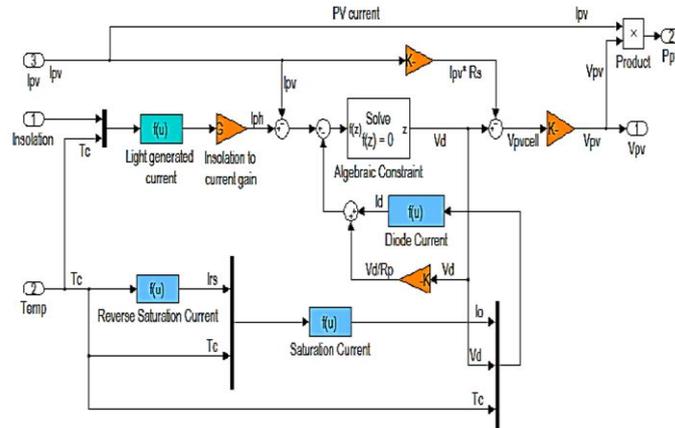
Donde  $\mu_{sc}$  es el coeficiente de temperatura de la corriente de cortocircuito de la célula,  $T_{ref}$  es la temperatura de referencia de la célula,  $I_{sc}$  es la corriente de cortocircuito de la célula a  $25^\circ\text{C}$  y  $1\text{ kW/m}^2$ , y  $G$  es la irradiación solar en  $\text{kW/m}^2$ . Además, la corriente de saturación de la célula ( $I_0$ ) varía con la temperatura de la célula, que se describe como [15]

$$I_0 = I_{0\alpha} \left(\frac{T_c}{T_r}\right)^3 \exp\left[\frac{eV_{g0}}{KF} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_c}\right)\right] \quad (9)$$

$$I_{0\alpha} = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{eV_{oc}}{KF T_c}\right)} \quad (10)$$

Donde  $I_{oa}$  es la corriente de saturación inversa de la célula a una radiación solar y una temperatura de referencia,  $V_g$  es la energía de la banda prohibida del semiconductor utilizado en la célula, y  $V_{oc}$  es la tensión de circuito abierto de la célula. En este estudio, se construye e implementa un modelo fotovoltaico general utilizando Matlab/Simulink para verificar las características de salida no lineal para el módulo fotovoltaico. Se implementa el modelo propuesto, como se muestra en la Figura 6. En este modelo, mientras que las entradas son la irradiación solar y la temperatura de la célula, las salidas son la tensión y la corriente fotovoltaica. Los parámetros de los modelos fotovoltaicos suelen extraerse de la hoja de datos de los fabricantes [16].

Fig. 6. Implementación del subsistema del modelo fotovoltaico [16]



#### 4.4 MODELADO Y DISEÑO DE UN WT Y UN GENERADOR DE INDUCCIÓN

Se han realizado varios estudios sobre el viento y los generadores eólicos [17]. En este estudio, el modelo de aerogenerador propuesto se basa en las características de velocidad del viento frente a la potencia de salida del aerogenerador. La potencia de salida del aerogenerador viene dada por [18]:

$$P_m = c_p(\lambda, \beta) \frac{\rho A}{2} v_{wind}^3 \quad (11)$$

Donde  $P_m$  es la potencia mecánica de salida de la turbina,  $c_p$  es el coeficiente de rendimiento de la turbina,  $\lambda$  es la relación de velocidad de punta de la pala del rotor,  $\beta$  es el ángulo de paso de la pala,  $\rho$  es la densidad del aire,  $A$  es el área de barrido de la turbina y  $v_{wind}$  es la velocidad del viento. El modelo de coeficiente de rendimiento  $c_p(\lambda, \beta)$  utilizado en este trabajo se toma de [16] y viene dado por:

$$c_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{(-c_5/\lambda_i)} + c_6 \lambda \quad (12)$$

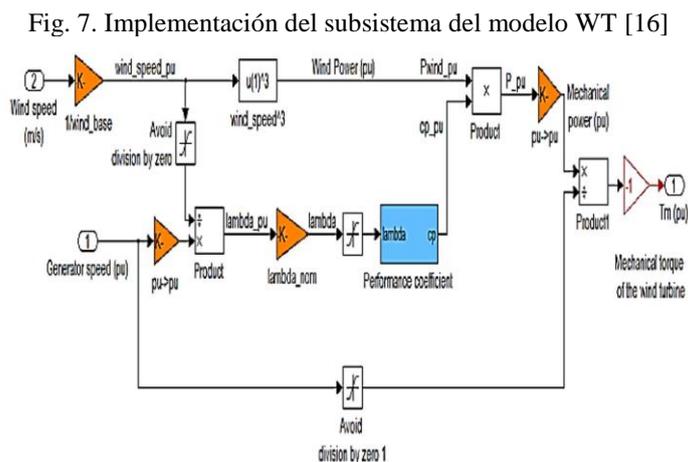
Donde las constantes c1 para c6 cuidar los parámetros que dependen del rotor del aerogenerador y del diseño de las palas, y  $\lambda_i$  es un parámetro dado en (7).

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (13)$$

Además, (5) puede normalizarse y simplificarse para valores específicos de A y  $\rho$ , como en (14):

$$P_{m-pu} = k_p c_{p-pu} v_{wind-pu}^3 \quad (14)$$

Donde  $P_{m-pu}$  es la potencia en por unidad (p.u.) de la potencia nominal para valores particulares de  $\rho$  y A,  $c_{sp-pu}$  el valor p.u. del coeficiente de rendimiento  $c_p$ ,  $k_p$  es la ganancia de potencia,  $v_{wind-pu}$  el valor p.u. de la velocidad del viento base. La velocidad del viento base es el valor medio de la velocidad del viento prevista en (m/s). El modelo modificado del WT se implementa como se muestra en la Figura 7. En este modelo, mientras que las entradas son la velocidad del viento y la velocidad del generador, la salida es el par aplicado al eje del generador. El par del generador se basa en la potencia y la velocidad del generador [16].



El modelo del Generador de inducción de la turbina eólica (GITE) se diseña utilizando la biblioteca incorporada de SimPowerSystem. El eje del rotor es accionado por el WT que produce el par mecánico en función de los valores del generador y de la

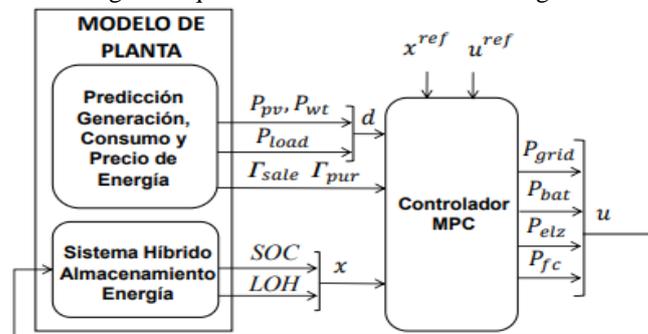
velocidad del viento. La salida de energía eléctrica del generador (devanado del estator) se conecta a la red inteligente [16].

#### 4.5 OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LA RED INTELIGENTE USANDO 3 MODELOS DE DEMANDA.

Para lograr la optimización de la red inteligente vamos a implementar un modelo de controlador predictivo lineal o MPC

El control MPC aplicado a microrredes se puede expresar de manera genérica con una estructura de diagrama de bloques como la que se muestra en la Figura 8.

Fig. 8. Esquema de control de la red inteligente.



Antes de diseñar el controlador predictivo debemos definir un modelo de predicción para las variables de entradas las cuales son las siguientes:

- Potencia entregada por la microrred fotovoltaicas Ppv
- Potencia entregada por la microrred eólica Pwt
- Potencia consumida por la demanda eléctrica Pload
- Precio de compra y venta de energía Ipur y Isale

Otra cosa muy importante es que la red inteligente en todo momento debe cumplir el siguiente balance energético:

$$P_{pv} + P_{wt} - P_{load} + P_{grid} + P_{bat} - P_{elz} + P_{fc}(t) = 0 \quad (15)$$

Donde Pbat es la potencia de la batería, - Pelz es la potencia electrolizadora, Pgrid es la potencia eléctrica intercambiada con la red y Pfc (t) potencia de la pila de combustible. Por otro lado, el modelo de control de la planta obtiene la evolución de las variables de estado de la microrred, que son el estado de carga de las baterías (SOC) y el nivel de hidrogeno almacenado la cual podemos expresar en la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{SOC}(t+1) &= \text{SOC}(t) + (P_{ch,bat}(t) \cdot \eta_{ch,bat} - (P_{dis,bat}(t)) / (\eta_{dis,bat})) / C_{bat} T_s \\ \text{LOH}(t+1) &= \text{LOH}(t) + T_s / V_{H2} (\eta_{elz} P_{elz}(t) - (P_{fc}(t)) / \eta_{fc}) \end{aligned} \quad (16)$$

Donde

- $P_{ch,bat}(t)$  y  $P_{dis,bat}(t)$  - representan la potencia de carga y descarga de las baterías,  $\eta_{ch,bat}$  y  $\eta_{dis,bat}$  representan los rendimientos de carga y descarga de las baterías
- $C_{bat}$  es la capacidad de almacenamiento de energía de las baterías  $\eta_{elz}$  y  $\eta_{fc}$  - Representan Las eficiencias (N m<sup>3</sup>/W) del electrolizador y la pila de combustible  $V_{H2}$  -Es la cantidad máxima de almacenamiento del tanque de hidrogeno. Estas ecuaciones se pueden representar en variables de control en espacio de estados para microrred usando la siguiente forma:

$$\begin{aligned} X(t+1) &= AX(t) + Bu U(t) + Bd d(t) \\ Y(t) &= C X(t) + Du U(t) + Dd d(t) \end{aligned} \quad (17)$$

Donde  $x$  representa las variables de estado,  $u$  son las variables de control,  $d$  son las perturbaciones, como son la generación de las fuentes renovables y cargas de consumo y, por último,  $y$  son las salidas del modelo. La función de coste que se integra en el bloque controlador MPC de la Figura 17 para un tiempo de muestreo  $T_s$  y un horizonte de predicción  $N_p$  se puede expresar de manera genérica como la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} J = & \sum_{j=1}^{N_p} \| \widehat{X}(t+j|t) - X^{ref}(t+j) \|^2_R + \dots \\ & \sum_{j=1}^{N_p} \| U(t+j-1) - U^{ref}(t+j-1) \|^2_{Q1} + \dots \\ & \sum_{j=1}^{N_p} \| \Delta U(t+j-1) \|^2_{Q2} \end{aligned} \quad (18)$$

sujeito a la dinámica local y las restricciones de amplitud y velocidad, donde  $X^{ref}$  es el valor de referencia para las unidades de almacenamiento  $U^{ref}$  es el valor objetivo para las potencias que puede ser cero en el caso en se quiera minimizar la compra de energía a la red o venir definido por algún planificador externo. La matriz  $R$  se usa para mantener el valor de SOC y LOH cercano a un valor de referencia, la matriz  $Q1$  se configura para garantizar que el controlador siga los objetivos deseados y la matriz  $Q2$  se ajusta para minimizar los incrementos de control en el electrolizador y la pila de combustible.

## 5 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

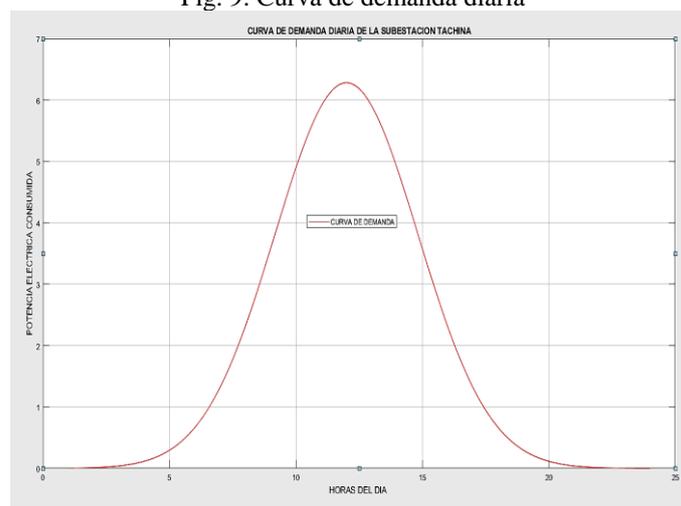
### 5.1 CALCULOS PARA LA POTENCIA ELECTRICA DEL LA MICRORRED INTELIGENTE

Para el dimensionamiento de la red eléctrica inteligente necesitaremos la curva de demanda anual en la ciudad de Esmeraldas y sabiendo el punto máximo de demanda y en los meses que ocurre el pico máximo saber cuánta potencia debe suministrar la microrred inteligente para repotenciar el sistema. En este caso se toma como ejemplo la subestación Tachina, la cantidad de energía que puede entregar es de 12 MW y la carga de los alimentadores son las siguientes:

ALIMENTADOR	POTENCIA
Alimentador Tachina	P1= 0.68 MW
Alimentador Isla	P2= 2.61 MW
Alimentador Camarones	P3= 1.12 MW
Alimentador Sudevesa	P4= 0.38 MW
Alimentador Zapallo	P5= 1.5 MW

Teniendo un total de la demanda máxima en su hora pico de 6.29 MW y una demanda media 4.74 MW, la curva demanda eléctrica diaria se puede representar por una función de distribución Normal Gaussiana con media de 4.74 MW y con una variación de 0.85 MW como se muestra en la Figura 9.

Fig. 9. Curva de demanda diaria



La red eléctrica inteligente de distribución la cual consta de un sistema de generación eólico, fotovoltaico, el cual ayudara a repotenciar el sistema eléctrico principal de distribución existente, aportara con 20 % de la energía debe cumplir los

requerimientos energéticos para funcionar adecuadamente de forma continua 24/7 (24 horas día, 7 días a la semana). Para lo cual necesitaremos hallar el consumo diario energético para lo cual usaremos la como se muestra en la Ecuación 19:

$$L_{md} = \frac{L_{md\ DC} + \frac{L_{ac}}{\eta_i}}{\eta_b \eta_c} \quad (19)$$

Donde

$L_{md}$  → Consumo medio energético

$L_{md\ DC}$  → Consumo medio energético de las cargas continuas

$L_{ac}$  → Consumo medio energético de las cargas en corriente alternativa

$\eta_i$  → Coeficiente de eficiencia del inversor

$\eta_b$  → Coeficiente de la batería

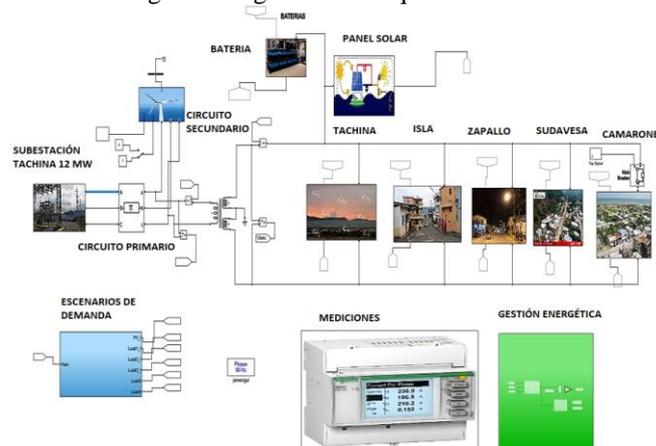
Para el cálculo vamos a tomar los siguientes datos  $\eta_i = 0,9$ ,

$\eta_b = 0,95$ ,  $\eta_c = 1$  y el consumo medio de las cargas alternas es del 20% potencia del y el consumo de medio de la carga continuas se puede sacar en función de la demanda media de carga alterna la cual es 0.5%

$$\begin{aligned} P_o &= 0.2 * 12 \text{ MW} = 2.4 \text{ MW} \\ L_{md\ DC} &= 0.05 * 2.4 \text{ MW} = 0.0012 \text{ MW} \\ L_{md} &= \frac{0.0012 \text{ MW} + \frac{2.4 \text{ MW}}{0.9}}{0.95 * 1} = 2.803 \text{ MW} \end{aligned} \quad (20)$$

En la imagen de la Figura 10 representa el diseño y la modelación la red inteligente usando el software MATLAB/SIMULINK

Fig. 10. Diagrama de bloques del sistema



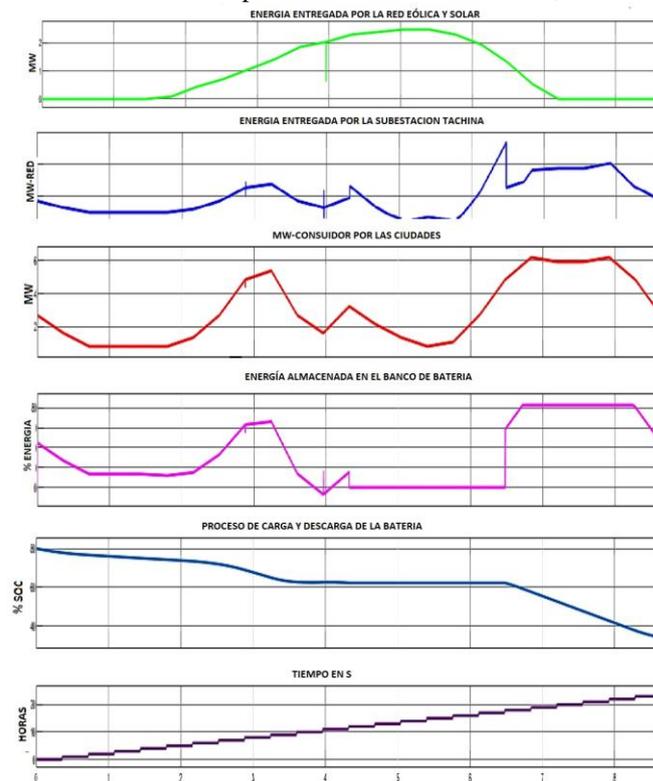
El diseño básicamente nos muestra como está conectada la microrred inteligente al circuito secundario que alimenta la demanda eléctrica de la ciudad de la ciudad de

Esmeraldas, el objetivo principal es repotenciar el sistema eléctrico de distribución existente.

## 5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN

Una vez realizada la simulación obtuvimos los siguientes resultados tal como se muestra en la Figura 11:

Fig. 11. Graficas de las curvas de potencia entregada por la red inteligente utilizando 3 modelos de demanda de potencia en cada hora del día,

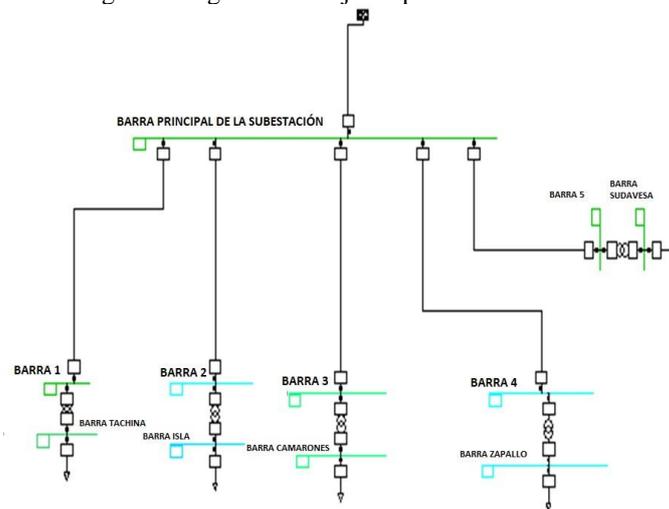


- 1) La primera grafica nos muestra la cantidad de potencia eléctrica que entrega la red fotovoltaica y a que horas entrega su potencia máxima de 2MW misma que es distribuida en horas pico.
- 2) La segunda grafica nos muestra la cantidad de energía suministrada por la red a la carga en diferentes horas del día.
- 3) La tercera grafica nos muestra la curva de demanda diaria de la ciudad y las horas pico de demanda.
- 4) La cuarta grafica nos indica las diferentes horas del día 0 a 24 horas.

### 5.3 ESTRATEGIA DE GESTIÓN ENERGÉTICA DEL SISTEMA.

La variabilidad de la potencia producida y la potencia demandada ocasionan que a lo largo del día exista un déficit o un exceso de energía, cuya magnitud depende de la época del año, de forma que la estrategia propuesta para la gestión del sistema plantea una evaluación continua de la diferencia de potencia entre la potencia generada por el sistema fotovoltaico y la potencia requerida. A partir de la diferencia determinada en cada momento, el sistema funciona según el estado de carga de la batería y el coste actual de la energía de la red eléctrica. La optimización de la operación de la red se formula a partir de una linealización de las ecuaciones de flujo de potencia AC para asegurar que se opera bajo los criterios de seguridad y limitaciones del sistema: tensión en cada bus, corriente máxima, factor de potencia etc. Además, debemos modelar convertidores de potencia para suministrar energía según sus curvas de operación reales. La estocasticidad se aplicará tanto a los recursos meteorológicos a partir de un análisis de datos históricos, como a la demanda eléctrica en base al estudio de valores de predicción y demanda reales en la Figura 12 podemos ver el diagrama de flujo potencia de la red inteligente.

Fig. 12. Diagrama de flujo de potencia del sistema



Del diagrama de Figura 12 podemos sacar las siguientes conclusiones:

- Existe un desbalance en la distribución energética en la red lo que se traduce en que perdidas de potencia, perdidas de eficiencia y robustes del sistema.
- La confiabilidad del suministro de energía en caso de contingencia es baja por lo cual en caso de que ocurra una falla aleatoria en cualquier punto de la red la transferencia de carga es lenta e inestable.

Una solución para resolver este problema es la optimización en la entrega de energía almacenada por red eólica y solar, para lograr esto vamos a hacer un balance energético entre la energía que entra la red fotovoltaica y eólica y el tiempo que dura la carga de los bancos de baterías de la red inteligente.

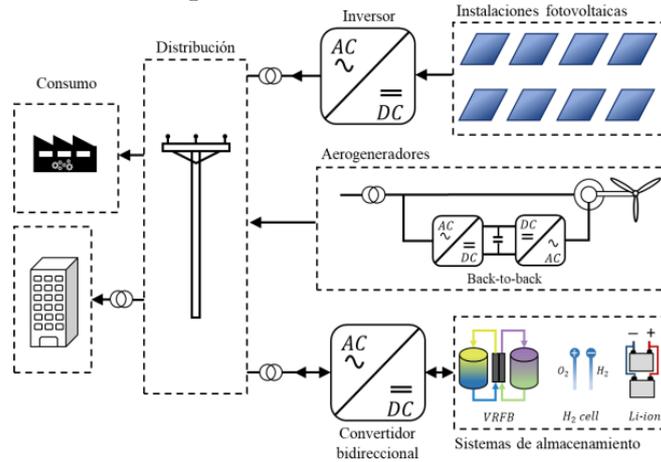
Potencia entregada por el sistema eólica	0.93 MW
Potencia entregada por el sistema fotovoltaica	1.86 MW
Potencia de almacenamiento	1000 KW
Capacidad de almacenamiento	465 KWH

El reparto de la capacidad inicial de almacenamiento, en una primera instancia, se considera el resultante se considera de esta manera

Tipo de batería	KW	Capacidad KW H	% Energía suministrada
Bateria H <sub>2</sub>	140	4613 ≈ 4.700	14 %
Vanadio redox	420	14460 ≈ 14.400	42%
Ión Litio	440	13527 ≈ 13.500	44%

La selección de estos bancos de baterías hace que la generación y almacenamiento sea eficiente el porcentaje promedio de almacenamiento de la red inteligente esta entre los 60 a 70 % por lo cual una forma de mejorar aún más estos porcentajes de energía almacenada útil, automatizando la red inteligente para que cuando en horas del día cuando la demanda se baja la red eólica y solar funcionen como una carga así los bancos de baterías pueden aumentar su capacidad energía almacenada, ya que no siempre los factores climáticos son óptimos para generación y acumulación de energía, es por eso hacer esto hace que siempre tengamos el energía de almacenamiento independiente de que el clima y el medio ambiente no sean los idóneos.

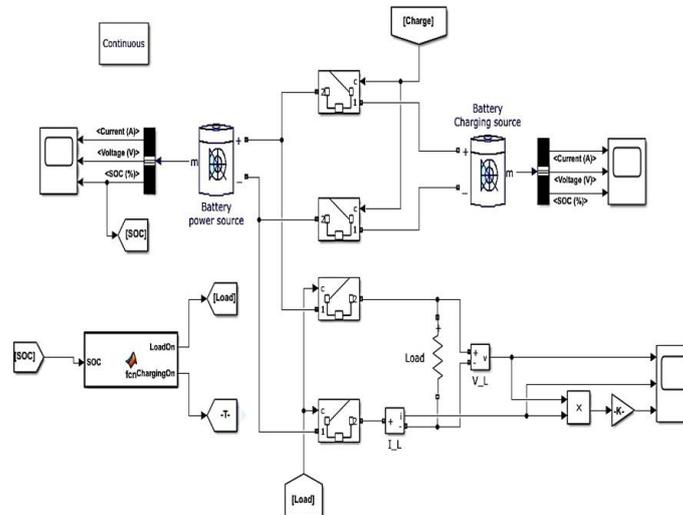
Fig. 13 Automatización de la red



#### 5.4 DISEÑO Y SIMULACION DEL PLAN DE CONTROL Y DE GESTIÓN ENERGÉTICA EN MATLAB Y SIMULINK

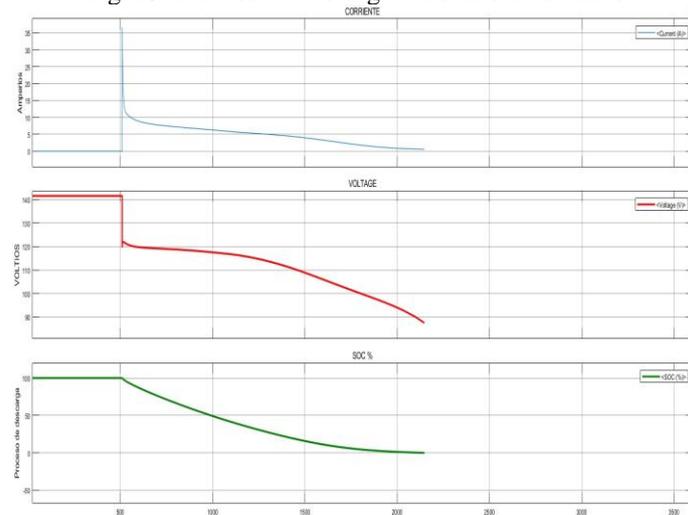
En el diagrama de la Figura 14 podemos apreciar el plan de control y de gestión energética del red inteligente donde, el principal objetivo de es optimizar la cantidad de energía almacenada en el banco de batería de la red eólica y fotovoltaica.

Fig. 14. Plan para la gestión energética de la red inteligente



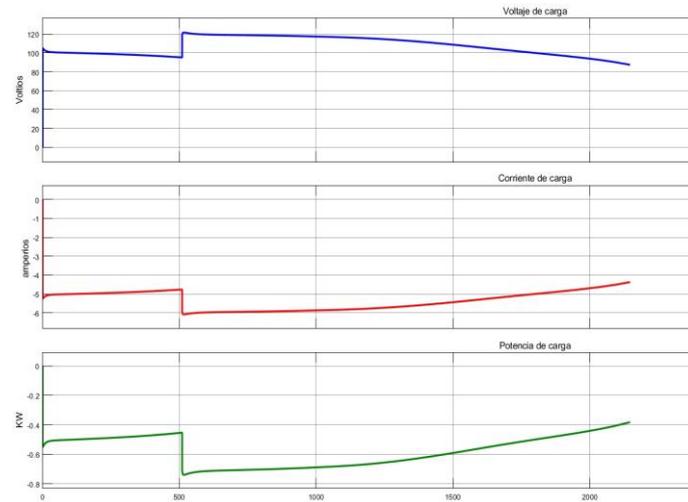
El modelo de gestión energética detallado en este estudio se divide en 2 etapas, la primera etapa es cuando el sistema entrega energía a la red y esto ocurre cuando el banco de baterías tanto de microrred eólica y solar están completamente cargados y en las horas pico de máxima demanda la red solicita energía para cubrir la demanda en la gráfica de la Figura 15 se muestra como es el proceso de descarga del banco de batería.

Fig. 15. Proceso de descarga del banco de baterías



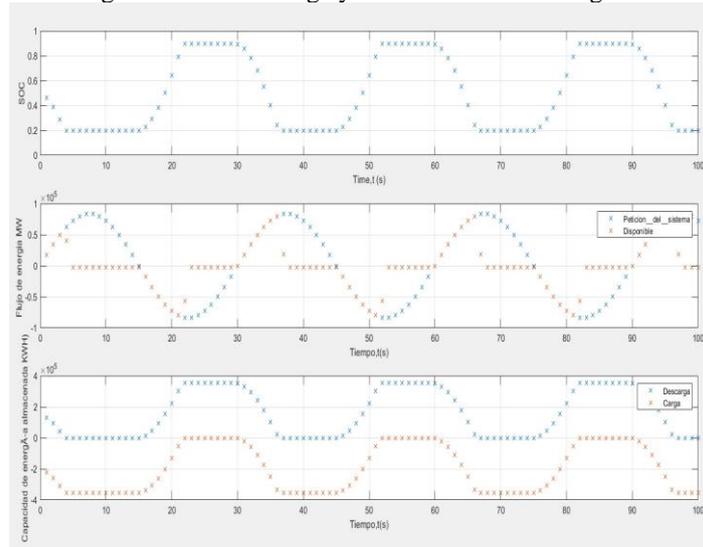
En la segunda etapa del sistema de gestión energética ocurre cuando la microrred eólica y fotovoltaica, absorben energía de la red la esto ocurre cuando la demanda es mínima generalmente se da en horas de la madrugada como lo muestra la Figura 16.

Fig. 16. Absorción de energía por parte de las fuentes de energía eólica y fotovoltaica en demanda mínima.



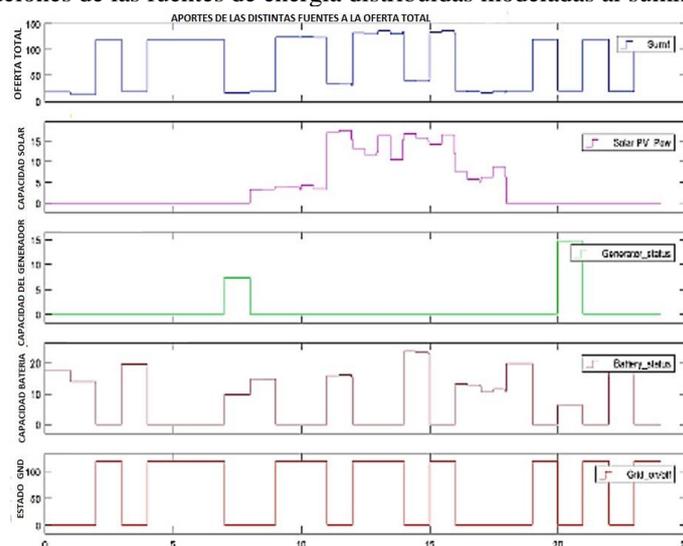
La tranferencia de energía electrica entregada a la red electrica por parte de la microrred inteligente ocurre de manera ciclica en cada periodo de 24 horas los 7 dias de la semana como se muestra en la Figura 17.

Fig. 17 Proceso entrega y consumo de red inteligente



La prueba de simulación realizada en el sistema modelado como se describe en la sección anterior demostró los diversos objetivos del trabajo. Se realizó una prueba de confiabilidad sobre el diseño propuesto y esto se indica en la Figura 18. La energía de la red de la figura 20 apareció durante 12 horas de las 24 horas, lo que representa el 50% de confiabilidad de la energía de la red para esta simulación y las contribuciones de las fuentes de energía alternativas distribuidas en varios momentos también se ven desde Figura 18, en el gráfico muestra la fuente de alimentación total disponible en diferentes momentos.

Figura 18. Contribuciones de las fuentes de energía distribuidas modeladas al suministro total de energía.



La Figura 19 muestra cómo la desconexión y reconexión automáticas evitaron que se produjera una sobrecarga (la demanda era mayor que la oferta) en el sistema. La línea

azul representa la energía consumida, mientras que la línea roja representa la fuente de alimentación disponible. Las cargas en el modelo de demanda propuesto se controlaron de acuerdo con los umbrales predefinidos para los diversos modos de operación. A partir del gráfico mostrado en la figura 19 se observó que, con la confiabilidad del 50% de la red, el sistema modelado aseguraba que las cargas con alta prioridad estuvieran funcionando durante el período de trabajo de los ocupantes. La Figura 20 mostró que el modelo experimentará sobrecargas (la demanda será mayor en un tiempo específico) cuando no se implemente el modelo propuesto.

Fig. 19. Fuente de alimentación vs consumo de energía para el sistema con modelo propuesto.

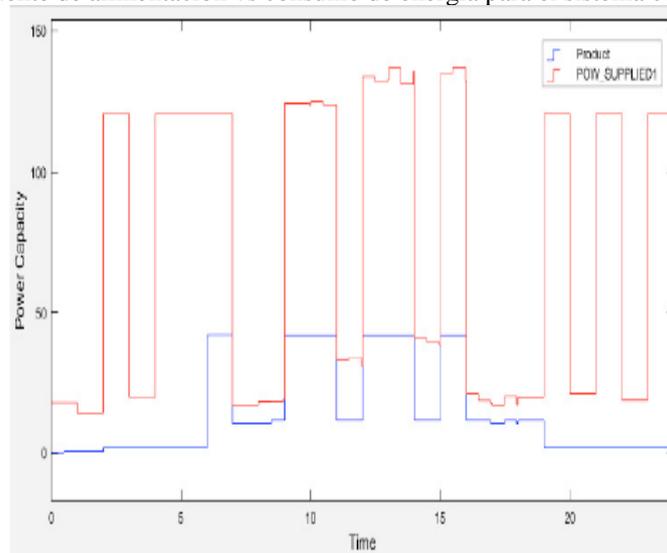
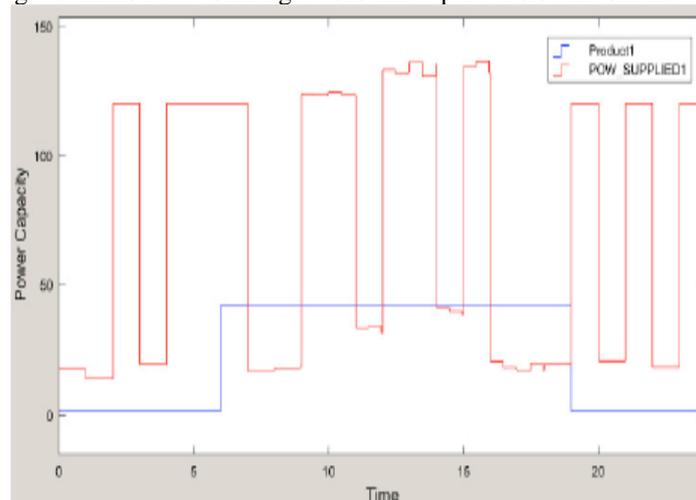


Fig. 20. Energía suministrada vs Energía consumida para el sistema sin modelo propuesto.



También se realizaron varias simulaciones para probar varios escenarios aumentando y disminuyendo la tasa de confiabilidad de la red y las contribuciones de las

diversas fuentes de energía alternativas distribuidas para probar la fiabilidad y el rendimiento del sistema. Los resultados de estas pruebas indicaron que, incluso en el peor de los casos, todos los modelos propuestos tendrán cargas de alta prioridad funcionando para asegurar la operatividad del sistema, como se ve en la Figura 14. Las estrategias de detección, control y comunicación entre la fuente de energía, el cuadro de distribución y las cargas revelaron que el objetivo de desarrollo de soluciones que permiten un control sostenible considerando el aumento de la carga manteniendo el sistema estable y con niveles de calidad de energía en niveles óptimos.

Durante el proceso de simulación, el objetivo era observar el comportamiento del modelo propuesto durante un largo periodo de tiempo, incluyendo casos diurnos y nocturnos. Los perfiles de irradiación solar y velocidad del viento se utilizaron para tener datos de uso de las fuentes renovables en el punto máxima potencia esto permitirá el uso de estas fuentes en tiempos específicos donde la demanda se incrementa lo que hace que las unidades de generación convencional entren a operar de forma extrema, acelerando su vida útil.

## 6 CONCLUSIONES

Este proyecto ha determinado una solución a la gestión inteligente de la energía, basada en la comparación de modelos de demanda con 3 fuentes de energía diferentes; por lo que el análisis de un acertado pronóstico de potencia y energía se convierte en un factor relevante e importante, esto permite realizar la operación y programación de las unidades de generación Eólica, Solar y almacenamiento de energía por medio de baterías dentro de este esquema, lo que permite tener un control sostenible solucionando la problemática del aumento de carga sin obviar los parámetros de estabilidad y de la calidad de energía sin que esto genere un fuerte impacto económico, social y ambiental. En este estudio conforme a las simulaciones realizadas en base a la comparación de los modelos de demanda propuestos permitirá adoptar sistemas de control diversos enmarcados en el desarrollo de una planeación operativa y comercial basados en modelos de optimización y eficiencia energética.

La comparación de modelos de demanda propuestos en MATLAB/SIMULINK con datos reales en base a los modelos de demanda definidos reveló la aplicabilidad de una solución de gestión inteligente de la energía. Los resultados de varias simulaciones con diferentes modos de funcionamiento demostraron la utilidad de un sistema de control que permite el uso de cada fuente de generación optimizando el despacho de energía de

manera controlada considerando múltiples accesos de energía, esto quiere decir que en el momento de que se presenten altas demandas en las horas picos contar con alternativas que ayuden a evitar que la generación convencional sienta ese desgaste propio de la demanda y es precisamente con el almacenamiento de energía de otras fuentes permitirá que exista un equilibrio en la demanda lo que condescenderá a tener un sistema más confiable y amigable con el medio ambiente. Este trabajo constituye mediante la comparación y el análisis de las diferencias en las características de la carga y las características de la salida de energía, se estudiará el impacto del nuevo consumo de energía.

El modelo de gestión energética planteado en este estudio logra los objetivos programados inicialmente, permitiendo una respuesta a la demanda óptima, por parte de los clientes, a las horas con mayor demanda de potencia y energía.

De esta manera, se mejora y optimiza, desde el punto de vista económico y técnico, la red eléctrica inteligente; como, por ejemplo, reduciendo pérdidas y costos de la red, mejorando los índices de calidad de energía, mejor confiabilidad, Sobre esta base, a partir de la función objetivo de la tasa de cambio de la potencia de salida del sistema combinado de almacenamiento de energía eólica y solar, la relación de la tasa de desviación de la potencia activa, la suma de la pendiente del pico de demanda, y la tasa de fluctuación de la potencia de salida son restricciones, por lo que la tendencia es la implementación de un plan de red de acceso multienergético.

## REFERENCIAS

- [1] A. de R. y C. de E. y R. N. no Renovables, “Panorama Eléctrico,” *Panorama Eléctrico, Edición 4*, vol. 4, p. 66, 2021.
- [2] Altomonte HCoviello MF. Lutz W, *Recursos Naturales e Infraestructura. Energías renovables y eficiencia energética en América Latina y El Caribe. Restricciones y perspectivas*. 2004.
- [3] E. Águila, R. Sohr, and C. Parker, *Energía y medio ambiente. Una ecuación difícil para América Latina: los desafíos del crecimiento y desarrollo en el contexto del cambio climático*. 2013.
- [4] R. Miceli, “Energy management and smart grids,” *Energies*, vol. 6, no. 4, pp. 2262–2290, 2013, doi: 10.3390/en6042262.
- [5] G. Arturo Gómez, J. Carlos Carreño, and J. Zambrano Caviedes, “Herramienta de software para el pronóstico de demanda horaria de potencia eléctrica en el sistema eléctrico de codensa S.A. ESP,” *Rev. Tecnura*, vol. 15, no. 28, p. 7, 2012, doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2011.1.a01.
- [6] R. De Guadalupe González Huerta, N. Jesús Hernández Pérez, J. Manuel, and S. Pineda, “Almacenamiento De Energía Como Alternativa a La Conexión a La Red Eléctrica.”
- [7] T. Doctoral and M. Nassourou, “Robust Economic Model Predictive Control of Smart Grids,” 2020.
- [8] Á. J. González López Directores and J. Eloy-García Carrasco Manuel García Plaza, “Gestión De La Energía En Una Red Inteligente,” *Gest. la Energ. en una Red Electr.*, pp. 60–115, 2012, [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/29403010.pdf>.
- [9] C. Mora, “Modelado de la Demanda de Potencia Eléctrica en Venezuela Mediante Series Cronológicas Autor : Carlos Mora Tutor : Cristóbal Vega Trabajo Especial de Grado,” no. June, 2021, doi: 10.13140/RG.2.2.28405.50408.
- [10] L. Gao, R. A. Dougal, and S. Liu, “Power enhancement of an actively controlled battery/ultracapacitor hybrid,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, no. 1, pp. 236–243, 2005, doi: 10.1109/TPEL.2004.839784.
- [11] D. D. E. R. T. Wissenschaften, “Gesamtenergetische Bewertung verschiedener Betriebsarten eines Parallel-Hybridantriebes mit Schwungradkomponente losem Weitbereichsgetriebe einen Personenwagen,” 1999.
- [12] V. H. Johnson, “Battery performance models in ADVISOR,” *J. Power Sources*, vol. 110, no. 2, pp. 321–329, Aug. 2002, doi: 10.1016/S0378-7753(02)00194-5.
- [13] R. L. Carraway, T. L. Morin, and H. Moskowitz, “Generalized dynamic programming for multicriteria optimization,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 44, no. 1, pp. 95–104, Jan. 1990, doi: 10.1016/0377-2217(90)90318-6.
- [14] J. C. H. Phang, D. S. H. Chan, and J. R. Phillips, “Accurate analytical method for the extraction of solar cell model parameters,” *Electron. Lett.*, vol. 20, no. 10, pp. 406–

408, 1984, doi: 10.1049/el:19840281.

[15] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, “Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 5, pp. 1198–1208, 2009, doi: 10.1109/TPEL.2009.2013862.

[16] E. M. Natsheh, A. Albarbar, and J. Yazdani, “Modeling and control for smart grid integration of solar/wind energy conversion system,” *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur.*, pp. 1–8, 2011, doi: 10.1109/ISGTEurope.2011.6162643.

[17] H. De Battista, R. J. Mantz, and F. Garelli, “Power conditioning for a wind–hydrogen energy system,” *J. Power Sources*, vol. 155, no. 2, pp. 478–486, Apr. 2006, doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2005.05.005.

[18] E. Muljadi and C. P. Butterfield, “Pitch-controlled variable-speed wind turbine generation,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 37, no. 1, pp. 240–246, 2001, doi: 10.1109/28.903156.