

**Contribución al dimensionamiento y gestión de energía
de sistemas eléctricos híbridos**

Ing. Ricardo Antonio Domínguez Gómez

Trabajo de grado para optar al título de Magister en Ingeniería Eléctrica

Director:

Prof. Javier Enrique Solano Martínez

Doctor en Ingeniería Eléctrica

Codirector:

Prof. Gabriel Ordóñez Plata

Doctor en Ingeniería Industrial en área de Ingeniería Eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Facultad De Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Maestría en Ingeniería Eléctrica

Bucaramanga

2019

Tabla De Contenido

Introducción	11
1. Objetivos	13
1.1 General.....	13
1.2 Específicos	13
2. Capítulo I	13
2.1 Marco Teórico.....	14
2.1.1. <i>Sistemas Eléctricos Híbridos -Seh-</i>	14
2.1.2. <i>Diseño Y Planeación -D&P- De Sistemas Eléctricos Híbridos -Seh-</i>	17
2.1.3. <i>Técnicas Computacionales De Mejoramiento Y/U Optimización Empleadas En El D&P De Seh.</i>	20
2.2 Estado Del Arte.....	22
2.3 Planteamiento Del Problema	30
2.3.1. <i>Metodología Del Proceso De D&P</i>	31
2.3.2. <i>Gestión De Energía A Través De Programación Dinámica -Dp-</i>	32
2.3.3. <i>Dimensionado A Través De Una Búsqueda Exhaustiva</i>	36
3. Capítulo II.....	37
3.1 Presentación Del Problema	37
3.2 Propuesta De Solución.....	41
3.2.1. <i>Metodología</i>	41
3.2.2. <i>Sistema De Gestión De Energía -Ems- Óptimo</i>	43
3.2.3. <i>Dimensionamiento Integrado</i>	45
3.2.4. <i>Evaluación De Soluciones</i>	45
3.3 Modelamiento	46
3.3.1. <i>Insumos</i>	46
3.3.2. <i>Modelamiento De Pilas De Combustible -Pc-</i>	47
3.3.3. <i>Modelamiento De Supercapacitores -Sc-</i>	47
3.4 Caso De Estudio.....	48
3.4.1. <i>Topología</i>	48
3.4.2. <i>Implementación</i>	48
3.4.3. <i>Resultados</i>	50
3.4.4. <i>Análisis De Resultados</i>	53
4. Capítulo III	55
4.1 Presentación Del Problema	56
4.2 Propuesta De Solución.....	58
4.2.1. <i>Metodología</i>	58
4.2.2. <i>Sistema De Gestión De Energía -Ems- Óptimo</i>	59
4.2.3. <i>Dimensionamiento Integrado</i>	61
4.2.4. <i>Evaluación De Soluciones</i>	61
4.3 Modelamiento	65
4.3.1. <i>Insumos</i>	65
4.3.2. <i>Modelamiento Paneles Fotovoltaicos -Pfv-</i>	66
4.3.3. <i>Modelamiento Del Generador Diésel -Gd-</i>	67

4.3.4. Modelamiento De Baterías -Bat-.....	68
4.4 Caso De Estudio.....	68
4.4.1. Topología.....	69
4.4.2. Implementación.....	70
4.4.3. Resultados.....	73
4.4.4. Análisis De Resultados	76
5. Conclusiones	78
Referencias.....	80

Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Características típicas de SG comúnmente utilizadas en SEH</i>	15
Tabla 2. <i>Características básicas de SAE en SEH</i>	16
Tabla 3. <i>Referencias de técnicas de optimización aplicadas a D&P de SEH</i>	23
Tabla 4. <i>Referencias enfoque de optimización aplicadas a las etapas de dimensionado y/o gestión de energía</i>	25
Tabla 5. <i>Herramientas computacionales comerciales empleadas para la D&P de SEH</i>	28
Tabla 6. <i>Ventajas y desventajas de varias técnicas de optimización y herramientas computacionales</i>	29
Tabla 7. <i>Resumen de resultados caso de estudio con VEH implementando un EMS óptimo y otro causal.</i>	53
Tabla 8. <i>Resultados análisis técnico-económico-ambiental de nanored aislada con PFV-BAT-GD</i>	74

Lista de Figuras

FIGURA 1. ESQUEMA PROPUESTO PARA LA INTEGRACIÓN DE LAS ETAPAS DE DIMENSIONAMIENTO Y GESTIÓN DE ENERGÍA PARA EL D&P DE UN SEH.	31
FIGURA 2. DISTRIBUCIÓN DE POTENCIAS ENTRE LAS FUENTES PC-SC Y LA CARGA	40
FIGURA 3. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA INTEGRACIÓN DE ETAPAS EN VEH CON FUENTES PC-SC	42
FIGURA 4. TOPOLOGÍA DEL CASO DE ESTUDIO DEL VEH CON PC+SC	48
FIGURA 5. PERFIL DE CONDUCCIÓN NEDC IMPLEMENTADO EN CASO DE ESTUDIO (DEPATURE ET AL., 2016)	49
FIGURA 6. CURVA TÍPICA DE EFICIENCIA VS POTENCIA DE SALIDA DE UNA PC (FEROLDI ET AL., 2009)	50
FIGURA 7. MAPA DE CALOR QUE RELACIONA EL CONSUMO DE ENERGÍA UNA PC CON EL DIMENSIONADO DE SUS FUENTES PC-SP PARA UN PROCESO DE D&P DE UN VEH.....	50
FIGURA 8. DISTRIBUCIÓN DE POTENCIAS ÓPTIMA PARA UNA CONFIGURACIÓN: PC = 10 kW - SC = 40 CELDAS	51
FIGURA 9. DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA POR UN EMS BASADO EN REGLAS PARA UNA CONFIGURACIÓN PC = 20 kW Y SC = 40 CELDAS.	52
FIGURA 10. CONSUMO DE ENERGÍA POR PARTE DE LA PC VS DIMENSIÓN DEL BANCO DE SC PARA LAS CONFIGURACIONES: A) PC _{15 kW} - SC ₄₀ CON EMS ÓPTIMO, B) PC _{20 kW} - SC ₄₀ CON EMS ÓPTIMO, C) PC _{15 kW} - SC ₄₀ CON EMS CAUSAL Y D) PC _{20 kW} - SC ₄₀ CON EMS CAUSAL.....	53
FIGURA 11. DISTRIBUCIÓN DE POTENCIAS ENTRE LAS FUENTES PFV-GD-BAT Y LA CARGA	56
FIGURA 12. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA INTEGRACIÓN DE ETAPAS EN UNA NANORED CON FUENTES PFV-GD-BAT	58
FIGURA 13. TOPOLOGÍA PARA INTEGRACIÓN DE ETAPAS EN UNA NANORED CON FUENTES PFV-GD-BAT	69
FIGURA 14. (A) CURVA DE IRRADIANCIA [W/m ²] GENERADA CON PVSYS PARA EL DÍA 20 DE JUNIO (B) CURVA DE P _{FV} [W] GENERADA POR UN PFV CON LA IRRADIANCIA GENERADA.	71
FIGURA 15. CURVA DE DEMANDA PARA LA ZONA RURAL DE ESTUDIO	72
FIGURA 16. CURVA DE DEMANDA PARA LA ZONA RURAL DE ESTUDIO	73
FIGURA 17. CASO 1: SIN PENETRACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES: (A) DISTRIBUCIÓN DE FLUJOS DE POTENCIAS; (B) CONSUMO DE DIÉSEL POR EL GD; (C) SOC DEL BANCO DE BAT	75
FIGURA 18. CASO 2: CON PENETRACIÓN MEDIA DE ENERGÍAS RENOVABLES: (A) DISTRIBUCIÓN DE FLUJOS DE POTENCIAS; (B) CONSUMO DE DIÉSEL POR EL GD; (C) SOC DEL BANCO DE BAT	75
FIGURA 19 CASO 3: CON PENETRACIÓN ALTA DE ENERGÍAS RENOVABLES: (A) DISTRIBUCIÓN DE FLUJOS DE POTENCIAS; (B) CONSUMO DE DIÉSEL POR EL GD; (C) SOC DEL BANCO DE BAT	76

Lista de abreviaturas

La lista de abreviaturas que se presenta a continuación se encuentra organizada en orden de aparición en el documento.

<i>SG</i>	Sistema de Generación	<i>FL</i>	Lógica Difusa
<i>SAE</i>	Sistemas de Almacenamiento de Energía	<i>MILP</i>	Problema Lineal de Enteros Mixtos
<i>SEH</i>	Sistemas Eléctricos Híbridos	<i>MIP</i>	Programación de Enteros Mixtos
<i>D&P</i>	Diseño y Planeación	<i>SQP</i>	Programación Secuencial Cuadrática
<i>VEH</i>	Vehículo Eléctrico Híbrido	<i>DP</i>	Programación Dinámica
<i>GD</i>	Generador Diésel	<i>MINLP</i>	Programación No Lineal de Enteros Mixtos
<i>PFV</i>	Panel Fotovoltaico	<i>IP</i>	Programación de Enteros
<i>PC</i>	Pilas de Combustible	<i>LP</i>	Programación Lineal
<i>H₂</i>	Hidrógeno	<i>MPDP</i>	Programación Dinámica Multi-Trayectos
<i>DC</i>	Corriente Directa	<i>NSGA-II</i>	Algoritmos Genéticos con Seleccionador No Dominado
<i>AC</i>	Corriente Alterna	<i>CO₂</i>	Dióxido de Carbono
<i>MPPT</i>	Seguidor de Punto de Máxima Potencia	<i>ZNI</i>	Zona No Interconectada
<i>P</i>	Potencia Activa	<i>VPPC</i>	Vehicle Power and Propulsion Conference
<i>Q</i>	Potencia Reactiva	<i>EMS</i>	Sistema de Gestión de Energía
<i>AVR</i>	Regulador de Voltaje Automático	<i>NEDC</i>	New European Driving Cycle
<i>BAT</i>	Baterías	<i>NOTC</i>	Temperatura de celda a una operación normal ($G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_a = 20^\circ\text{C}$)
<i>SC</i>	Supercapacitores	<i>ESSA</i>	Electrificadora de Santander S.A
<i>TIR</i>	Tasa Interna de Retorno	<i>COP</i>	Pesos Colombianos
<i>SOC</i>	Estado de Carga		
<i>AI</i>	Inteligencia Artificial		
<i>GA</i>	Algoritmos Genéticos		
<i>ANN</i>	Redes Neuronales Artificiales		
<i>PSO</i>	Optimización de Enjambre de Partículas		
<i>BBO</i>	Optimización Basada Biogeografía		
<i>HS</i>	Búsqueda Armónica		
<i>ACO</i>	Optimización por Colonia de Hormigas		
<i>SA</i>	Recocido Simulado		

RESUMEN

Título: CONTRIBUCIÓN AL DIMENSIONAMIENTO Y GESTIÓN DE ENERGÍA DE SISTEMAS ELÉCTRICOS HÍBRIDOS

Autor: Ing. RICARDO ANTONIO DOMÍNGUEZ GÓMEZ ¹

Palabras claves: Sistemas Eléctricos Híbridos, Diseño y Planeación, Dimensionamiento, Gestión de Energía, Gestión de Flujos de Potencia, Integración, Nanored Aislada, Vehículo Eléctrico Híbrido, Optimización, Programación Dinámica.

Descripción: A través de este estudio se analizará la influencia de una gestión de flujo de potencias óptima en una etapa de dimensionamiento óptimo durante del proceso de diseño y planificación de un sistema eléctrico híbrido. Así, la etapa de dimensionado es desarrollada teniendo en cuenta el valor de potencias designadas para cada instante de tiempo y no con base en valores promedios de energía, lo que se acercaría más a la realidad. Se plantea una metodología de integración de etapas a través de un algoritmo, con una capa interna que desarrolle la estrategia de gestión de flujo de potencias óptimo a través de Programación Dinámica y una capa externa que desarrolla el dimensionamiento óptimo mediante una búsqueda exhaustiva. Se evalúan dos casos de estudio: Primero, un Vehículo Eléctrico Híbrido compuesto por Supercondensadores y Pilas de Combustible y segunda, una nanored eléctrica aislada compuesta por paneles Fotovoltaicos, Baterías y Generador Diésel.

¹ Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería Eléctrica. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Dr. Javier Enrique Solano Martínez y Co-director: Dr. Gabriel Ordóñez Plata.

ABSTRACT

Title: CONTRIBUTION TO THE SIZING AND ENERGY MANAGEMENT OF HYBRID ELECTRICAL SYSTEMS

Author: Eng. RICARDO ANTONIO DOMÍNGUEZ GÓMEZ ²

Keywords: Hybrid Electric Systems, Design & Planning, Sizing, Energy Management, Power Flow Management, Integration, Nanored Off-grid, Hybrid Electric Vehicle, Optimization, Dynamic Programming.

Description: Through this study, the influence of an optimal power flow management on an optimal sizing stage within the design and planning process of a hybrid electrical system will be analyzed. Thus, the sizing is developed considering the values of designated power flows for each instant of time and not based on average energy values, which would be closer to reality. An integration methodology is proposed through an algorithm, with an internal layer that develops the optimal power flow management strategy based on Dynamic Programming and an external layer that develops the optimal sizing through an exhaustive search. Two case studies are evaluated: First, a Hybrid Electric Vehicle configured with Supercapacitors and Fuel Cells and second, an isolated electric nanogrid configured with Photovoltaic Panels, Batteries and Diesel Generators.

² Research work to qualify for the Master of Sciences degree in Electrical Engineering. Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronics and Telecommunications Engineering. Director: PhD. Javier Enrique Solano Martínez and Co-director: PhD. Gabriel Ordóñez Plata

Introducción

En la búsqueda de soluciones enfocadas a innovar, generar energía de alta calidad, confiabilidad, sostenibilidad y rentabilidad, entre otros aspectos, emergen nuevos conceptos, tecnologías y estructuras en los sistemas de generación -SG- y sistemas de almacenamiento energía -SAE-, como lo son los sistemas eléctricos híbridos -SEH-. Un buen proceso de diseño y planeación -D&P- de estos sistemas promoverá el aumento del uso de energías renovables, la reducción del consumo de combustibles fósiles, de emisiones de gases de efecto invernadero y su huella de carbono, además del mejoramiento en la rentabilidad económica, por lo cual, aumentará su viabilidad para ser implementados como soluciones atractivas de generación de energía eléctrica sostenible, rentable y de calidad a las necesidades que enfrenta el mundo moderno.

El proceso de D&P de un SEH es considerado un proceso complejo debido a todas las alternativas, limitantes o variables a considerar en cualquier nivel de decisión (Gamarra & Guerrero, 2015). Cada una de estas decisiones, no solo influenciará en el aspecto de la rentabilidad económica, sino también en las capacidades del sistema como lo son confiabilidad y estabilidad, entre otros. Por estas razones, los procesos de D&P de los SEH son contruidos alrededor de metas y limitantes específicas basadas en la implementación particular del SEH, convirtiéndose usualmente, en una secuencia de problemas de optimización y/o compromisos para satisfacer los requerimientos necesarios. Entre las etapas a destacar del proceso de D&P de un SEH y que generalmente son desarrolladas son: Selección, Dimensionamiento, Ubicación, Gestión de energía y Análisis sensitivo (Chauhan & Saini, 2014; Gamarra & Guerrero, 2015).

La particularidad que tienen estas etapas del proceso, es que las funciones objetivos empleadas para cada una son opuestas debido a que se debe hacer un compromiso entre la eficiencia de los costos, la confiabilidad, la calidad y el impacto ambiental, dependiendo de variables tales como la factibilidad económica para diferentes fuentes de energía renovables, tipo de fuentes a implementar, costos de producción de energía, asignación de la distribución de la energía, costos de inversión, operación y mantenimiento, entre otros. Por este motivo, usualmente hay dificultades en integrar las diferentes etapas, ya que aparecen conflictos de interés entre dichas características deseadas (Gamarra & Guerrero, 2015).

Esta investigación está orientada en estudiar metodologías de integración de las etapas de dimensionamiento y gestión de la energía de un SEH en su proceso de D&P, analizando los efectos que puedan generarse por dicha integración. Se tomarán dos casos de estudio de implementación de un SEH: Una nanored eléctrica operando en modo aislado y otra como un vehículo eléctrico híbrido -VEH-. Estos casos de estudio se simularán con perfiles de demanda y generación ya conocidos.

1. Objetivos

A continuación, se presentan tanto el objetivo general, como los objetivos específicos de este trabajo de investigación.

1.1 General

Proponer e implementar un algoritmo para la integración de las etapas de dimensionamiento y gestión de energía de un sistema de generación híbrido.

1.2 Específicos

Proponer un algoritmo para la integración de las etapas de dimensionamiento y gestión de energía de un sistema de generación híbrido.

Implementar el algoritmo propuesto en la etapa precedente en un software apropiado como Matlab / Octave / Scilab o un software similar.

Evaluar mediante simulaciones el algoritmo propuesto, particularmente, la influencia de los parámetros de la gestión de energía en el dimensionado de la fuente híbrida.

2. Capítulo I

En este capítulo se complementa la introducción al tema de investigación a desarrollar a través de un marco teórico que contextualice los conocimientos requeridos para comprender la resolución a la problemática expuesta, un estado del arte sobre el área científica de estudio, así como el planteamiento de solución a la pregunta de investigación.

2.1 Marco teórico

2.1.1. Sistemas Eléctricos Híbridos -SEH-

Un SEH combina dos o más formas de generación de electricidad. En casos de generación eléctrica distribuida, usualmente se incluyen energías renovables con alguna opción convencional no renovable tal como un generador diésel -GD- o gasolina (Chauhan & Saini, 2013). Entre los componentes de un SEH podríamos encontrar los SG, sistemas de control, SAE, protecciones, electrónica de potencia, cargas, entre otros. Para efectos de esta investigación, nos centraremos en los SG y SAE.

2.1.1.1. Sistemas de generación -SG-. Encargados de la generación de energía en un SEH. Las tecnologías de SG aplicables a SEH pueden incluir tecnologías emergentes, tales como paneles fotovoltaicos -PFV-, turbinas eólicas, micro-hidroeléctricas, pilas de combustible -PC-, micro-turbinas (manejadas por gas natural, hidrógeno -H₂-, biogás), micro-cogeneración; y algunas ya establecidas como los generadores de inducción monofásico y trifásico, motores stirling o los generadores síncronos controlados por motores de combustión interna o grupos de electrógenos (Lidula & Rajapakse, 2011).

Los SG se pueden clasificar en dos grupos: Despachable y No Despachable, también conocidos como intermitentes, en términos de control de flujo de potencia.

La salida de potencia de un generador despachable puede ser controlada externamente, a través de puntos de operación provistos por un sistema de control. Pueden ser de rápida actuación o

respuesta lenta (Muñoz, 2012). Son ejemplos de generadores despachables, la generación combinada de energía eléctrica y calor, micro-cogeneración basada en GD, motores stirling, PC o micro-turbinas. En contraste, la salida de potencia de un generador no despachable o intermitente es normalmente controlada con base en la condición de operación óptima de su fuente de energía primaria, por lo que pueden ser muy cambiantes. Las unidades de generación que se basan en energías renovables son frecuentemente unidades generadoras no despachables o intermitentes, tales como los sistemas con PFV, turbinas eólicas, micro-hidroeléctricas, entre otros.

Hay que resaltar que existe la posibilidad de transformar un SG intermitente en un sistema generador despachable realizando algunas modificaciones, por ejemplo, adicionando un SAE, convirtiéndolo en un SEH (Muñoz, 2012).

La tabla 1. muestra las características típicas de las SG comúnmente implementadas en un SEH en una microrred eléctrica.

Tabla 1.
Características típicas de SG comúnmente utilizadas en SEH

<i>Características</i>	<i>Solar</i>	<i>Eólica</i>	<i>Micro-hidráulica</i>	<i>Diésel (GD)</i>	<i>CHP</i>
Disponibilidad	Depende de la geografía	Depende de la geografía	Depende de la geografía	Cualquier momento	Depende de la fuente
Potencia de salida	DC	AC	AC	AC	AC
Emisiones efecto invernadero	No	No	No	No	Depende de la fuente
Control	No controlable	No controlable	No controlable	Controlable	Depende de la fuente
Interface típica	Convertidor (DC-DC-AC)	Convertidor (AC-DC-AC)	Generador de Inducción o Síncrono	No	Generador Síncrono
Control del flujo de potencia	MPPT & Controles de voltaje a DC (+P,±Q)	MPPT, Pitch & Control de toque (+P,±Q)	Controlable (+P, ±Q)	Controlable (+P, ±Q)	AVR y gobernador (+P,±Q)

Nota: Adaptado de (Chauhan & Saini, 2013, 2014; Gamarra & Guerrero, 2015)

2.1.1.2. Sistemas de almacenamiento de energía -SAE-. Es otro elemento de un SEH. Los SAE cumplen funciones como: Balancear la energía a corto plazo, la demanda de energía requerida con la energía que se genera, garantizar suministro ininterrumpido, pueden actuar como fuente de voltaje AC y apoyan la gestión de energía, entre otros (Mariam, Basu, & Conlon, 2013).

Las clasificaciones básicas de los SAE son: Químicos (baterías -BAT-, almacenamiento de H₂, Eléctricos (condensadores, supercapacitores -SC-, superconductores) y Mecánicos (almacenamiento de agua bombeada o aire comprimido, volantes de inercia).

En la tabla 2. se presentan, de manera resumida las características de las clases de dispositivos de almacenamiento empleados en SEH.

Tabla 2.
Características básicas de SAE en SEH

<i>Características</i>	<i>Baterías</i>	<i>Volantes de inercia</i>	<i>Supercapacitores</i>	<i>Pilas de Combustible</i>
<i>Densidad de potencia (W/kg)</i>	50-100	200-500	500-2000	4000-9000
<i>Densidad de energía (Wh/kg)</i>	10-70 / 75-240	10-30	0,5-15	0,5-10
<i>Tasa de auto descarga diaria (%)</i>	0,1-0,6 / 10-20	100	10-40	10-20
<i>Tiempo de respaldo</i>	5-30 min	10-30 seg	10-30 seg	5-40 seg
<i>Perdidas en reposo</i>	Muy bajas	Variables	Altas	Variables
<i>Impacto ambiental</i>	Medio-Alto	Bajo	Bajo	Bajo
<i>Mantenimiento</i>	1 al año	1 a 5 años	No	1 a 5 años
<i>Eficiencia de carga (%)</i>	75-95	90	85-90	40-90
<i>Precio de la energía (\$/kWh)</i>	150-800	3000-4000	4000-5000	4000
<i>Vida útil (años)</i>	5	20	>10	>10

Nota: Adaptado de (Chauhan & Saini, 2013, 2014)

2.1.2. Diseño y planeación -D&P- de Sistemas Eléctricos Híbridos -SEH-

El proceso de D&P puede ser enfocado como una secuencia de problemas de optimización por etapas, entre las más comunes encontradas en la literatura son (Gamarra & Guerrero, 2015):

- Selección de las SG y los SAE.
- Dimensionamiento de las SG y los SAE seleccionados.
- Ubicación de las tecnologías seleccionadas en el sistema de distribución.
- Gestión de la energía.
- Análisis sensitivo.

Enfocados en los objetivos de esta investigación, se profundizarán las etapas que se integrarán:

2.1.2.1. Dimensionamiento de SG y SAE. El objetivo de esta etapa es determinar la capacidad de los SG y del SAE seleccionados para satisfacer los requerimientos de la demanda reduciendo el costo final del sistema, mientras se mantiene la confiabilidad y correcta operación de este. Tanto la generación como el almacenamiento, convencionalmente son dimensionados de acuerdo al pico de la demanda y a la rentabilidad. Debe considerar calidad, confiabilidad, costo del ciclo de vida. Debe cumplir: alta rentabilidad y confiabilidad, además de bajo impacto ambiental.

Entre las restricciones que podemos encontrar están: La disponibilidad de fuentes, el pico de la demanda de carga, la disponibilidad de conexión a la red, el límite de emisiones de gases de invernadero, el mínimo de penetración de fuentes de energía renovable, entre otros. Las distintas soluciones que se pueden presentar difieren según los algoritmos de optimización, las restricciones consideradas y las tecnologías de SG y SAE empleadas (Gamarra & Guerrero, 2015).

En los criterios económicos, los parámetros como Costo Actual Neto -APN-, Costo Nivelado de la Energía, Costo Anualizado de Sistema -ACS-, Período de Recuperación de Inversión -PRI-, Tasa Interna de Retorno -TIR-, entre otros, pueden ser considerados. Entre los parámetros de confiabilidad se incluyen parámetros como Probabilidad de Pérdida de Suministro de Energía, Probabilidad de Pérdida de Energía, Rata de Cubrimiento de Demanda, Energía que se Espera No Sea Suministrada, Relación de Índice de Energía, Nivel de Autonomía, entre otras (Chauhan & Saini, 2014).

2.1.2.2. Gestión de energía (Gestión de flujos de potencia). Es la etapa donde se ejecuta la estrategia para administrar y programar la operación de los SG y SAE en orden de lograr los objetivos y funcionamiento del SEH para el que fue diseñado. En la literatura, esta etapa es llamada generalmente como Gestión de Energía (Energy Management), pero en realidad, lo que se desarrolla internamente en ella es una distribución de potencias entre los SG-SAE-Carga, por lo que se considera que su nombre debería ser Gestión de flujos de potencia o Power Management. Por lo tanto, se invita a tener claridad que siempre que se hable de gestión de energía en esta investigación, se hace referencia realmente a gestión de flujos de potencias.

Entre objetivos y estrategias de un Sistema de Gestión de Energía -EMS- se pueden encontrar: reducir costos de operación, aumentar eficiencias, reducir emisiones, aumentar fiabilidad del sistema, entre otras métricas que serán escogidas de manera particular para cada SEH según su aplicación. (Zamora & Srivastava, 2010) en su trabajo propone algunos criterios en los que se podrían basar los EMS:

- Asegurar que las cargas cumplan sus requerimientos energéticos generados por el SEH.
- Asegurar que el SEH cumpla las limitantes de operación con alta rentabilidad.

- Reducir las pérdidas del sistema.
- Aumentar la eficiencia operativa del SEH.

Usualmente la etapa de gestión de energía se aborda también como un proceso multipropósito con posible conflicto de interés entre los objetivos deseados, tales como minimización de costos de generación de energía y de emisiones, por lo cual, una respuesta absoluta y óptima no es obtenida, sino un conjunto de posibles soluciones bajo ciertos compromisos. La evaluación por medio de las soluciones de los frentes de Pareto, son de las más usadas para determinar ese tipo de soluciones (Sorrentino, Pianese, & Maiorino, 2013).

Entre las principales restricciones que se encuentran en el diseño de la gestión de la energía en un SEH están: Limitaciones mínimas y máximas de energía del SEH, valores mínimo y máximo del Estado de Carga -SOC- de los SAE, el máximo de emisiones de gas de efecto invernadero generadas, la máxima energía consumida desde la red, las ratas de carga y descarga del SAE, el costo operativo y de mantenimiento, balance de potencias, entre otras (Gamarra & Guerrero, 2015).

Se pueden encontrar dos alternativas de gestión: En tiempo real, basada en el estado del sistema o gestión óptima, basada en perfiles de carga y generación predeterminados. Las técnicas de gestión basadas en perfiles conocidos se implementan *offline* y proponen leyes de distribución adaptadas a un perfil sin considerar la incertitud de las condiciones reales, pero con base en dichos perfiles conocidos podrían encontrarse soluciones con óptimos locales y/o globales. Mientras que las técnicas de gestión *online* utilizan información del estado del sistema (potencia, tensión, estados de carga, etc.) actual y generalmente se basan en conjuntos de reglas predeterminadas que

permiten una gestión en tiempo real. Sin embargo, las soluciones no necesariamente serán las óptimas.

2.1.3. Técnicas computacionales de mejoramiento y/u optimización empleadas en el D&P de SEH.

El término optimización computacional se refiere a un grupo de técnicas matemáticas que se centran en la selección de una solución óptima o casi-óptima con respecto a algunos criterios dentro de un conjunto de alternativas disponibles. De hecho, la optimización propone encontrar los mejores valores disponibles de alguna función objetivo dado un dominio definido o un conjunto de restricciones, incluyendo una amplia gama de funciones objetivo y tipos de dominios (Gamarra & Guerrero, 2015). Dados estos dominios y conjunto de restricciones y características del problema, en algunos casos es inviable llegar a la solución óptima, por lo que se emplean también métodos aproximados, los cuales no hallarán una respuesta óptima, pero si lo más cercana posible dependiendo de su diseño e implementación, cumpliendo las especificaciones del problema.

Dependiendo del enfoque, de los datos que se suministren, de las funciones objetivos y restricciones, existen diferentes tipos y clasificaciones de técnicas empleadas para optimizar funciones objetivos o aproximarlas a esos valores (Chauhan & Saini, 2014; Gamarra & Guerrero, 2015), entre las que encontramos:

Heurísticos y Metaheurísticos: Se pueden catalogar como aproximados. Requieren menos esfuerzo computacional, pero no garantizan una respuesta óptima. La mayoría son técnicas basadas en inteligencia artificial -AI-, trayectorias metaheurísticas, en evolución de poblaciones o inspirados en algún comportamiento de la naturaleza. Son ejemplo de estas técnicas los Algoritmos

Genéticos -GA-, Redes Neuronales Artificiales -ANN-, Optimización de Enjambre de Partículas -PSO-, Optimización Basada Biogeografía -BBO-, Búsqueda Armónica -HS-, Optimización por Colonia de Hormigas -ACO-, Recocido Simulado -SA-, Lógica Difusa -FL-. También es posible construir un híbrido entre tales técnicas, donde un algoritmo halle una solución primaria y el otro la mejor solución. Estos algoritmos pueden manejar las variaciones no lineales de los componentes de un SEH o la intermitencia natural de las fuentes renovables. Los enfoques de AI aplicados a energías renovables, no necesitan disponibilidad de datos meteorológicos.

Mono-Objetivo: Plantea una solución única enfocada en modificar y mejorar ese único candidato durante el proceso de búsqueda. Son algunos ejemplos de estas técnicas: Problema Lineal de Enteros Mixtos -MILP-, Multiplicadores de Lagrange, Programación de Enteros Mixtos -MIP-, Programación Secuencial Cuadrática -SQP-, Programación Dinámica -DP-, Programación No Lineal de Enteros Mixtos -MINLP-, Programación de Enteros -IP-, Programación Lineal -LP-, Programación Dinámica Multi-Trayectos -MPDP-.

Multi-Objetivos: Tiene dos enfoques generales: a) Integrar las funciones objetivos en una sola. b) Determinar un conjunto de soluciones óptimas de Pareto o un conjunto sub-representativo. La solución obtenida se dice que es un Pareto óptimo, si es dominante entre las demás soluciones en el espacio de soluciones. Un Pareto óptimo no puede ser mejorado con respecto a cualquier objetivo sin deteriorar al menos otro. El objetivo principal de un algoritmo de optimización multi-objetivo es conocer las soluciones en el conjunto óptimo de Pareto. Se pueden conformar realizando híbridos. Algunos ejemplos son Algoritmos Genéticos con Seleccionador No Dominado -NSGA-II-, SA o la teoría del juego (Chauhan & Saini, 2014; Gamarra & Guerrero, 2015).

Métodos Analíticos: En su enfoque, las componentes de la SEH son caracterizados por modelos computacionales para encontrar la viabilidad del sistema. Por lo tanto, el rendimiento del sistema puede ser evaluado para un conjunto de configuraciones de sistema factible para un tamaño específico de los componentes. La mejor configuración de un sistema integrado de energía se evalúa mediante la comparación simple o un índice de rendimiento múltiple de las diferentes configuraciones.

Probabilísticos: El enfoque probabilístico puede considerar por ejemplo el efecto de la radiación solar y los cambios en la velocidad del viento para el diseño del sistema. En este enfoque, los modelos adecuados para la generación y/o la demanda de recursos se desarrollan y, finalmente, un modelo de riesgo es creado por una combinación de estos modelos. Sin embargo, esta técnica de optimización no puede caracterizar la dinámica cambiando el rendimiento del sistema integrado/híbrido.

2.2 Estado del arte

En la literatura se encuentra un buen número de investigaciones sobre D&P de un SEH, técnicas computacionales de optimización o de mejoramiento de desempeño aplicadas al proceso, donde dependiendo de las restricciones, características y condiciones del problema, variarán las soluciones, como abordar el problema, qué técnicas implementar y cuál sería la metodología por usar. La mayoría de estas investigaciones se enfocan en las etapas de manera independiente e individual y no como un proceso global.

Respecto a las técnicas de optimización empleadas para el mejoramiento de las etapas del proceso de D&P, (Gamarra & Guerrero, 2015) presenta una completa revisión de técnicas

computacionales de optimización enfocadas al proceso de D&P para un SEH, técnicas computacionales más empleadas para el proceso, metodología de desarrollo de D&P abordando las etapas de manera independiente. En (Chauhan & Saini, 2014) proporcionan una revisión de SG y SAE, configuración de SEH para aplicaciones de microrred y metodologías de optimización de la etapa de dimensionado exponiendo los criterios empleados para llevar a cabo el proceso, etc; además, se comparan herramientas comerciales para el proceso de dimensionado con las técnicas de mejoramiento dando sus ventajas y desventajas. Anteriormente, (Chauhan & Saini, 2013) desarrolló una metodología para el D&P de un SEH en operación aislada y clasifican técnicas de optimización empleadas para el proceso D&P. (Baños et al., 2011) clasificó las técnicas de optimización como Mono-Objetivo y Multi-Objetivos; además muestran la aplicación de los métodos de optimización en el dimensionamiento y modelamiento de las energías: Eólica, Solar, Hydro, Geotérmica e Híbrida.

A continuación, se presenta la tabla 3 y 4 con las referencias revisadas sobre técnicas de optimización empleadas en el mejoramiento del desarrollo de las etapas de dimensionamiento y/o gestión de energía aplicadas a D&P de SEH.

Tabla 3.

Referencias de técnicas de optimización aplicadas a D&P de SEH

<i>Enfoque</i>	<i>Método - Algoritmo</i>	<i>Etapas Aplicadas</i>	<i>Referencias</i>
<i>Mono-Objetivo</i>	MILP	Dimensionado	(S. X. Chen, Gooi, & Wang, 2012; Litchy, Young, Pourmousavi, & Nehrir, 2012; Marnay et al., 2007)
	Multiplicadores de Lagrange-KKT	Dimensionado	(Han, Young, & Zimmerle, 2013)
	Método de Reducción de Gradiente	Dimensionado	(Augustine, Suresh, Moghe, & Sheikh, 2012)
	MIP	Dimensionado	(Logenthiran, Srinivasan, Khambadkone, & Raj, 2010; Vafaei & Kazerani, 2011)
	SQP	Gestión	(Mohamed & Koivo, 2010)

Multi-Objetivos	DP	Gestión	(Audio Pinto, Barreras, De Castro, Araújo, & Schaltz, 2017; Gu et al., 2014; Huang, Chen, Liao, & Lu, 2012; H. Kanchev, Lazarov, & Francois, 2012; Kim & Peng, 2007; Masih-Tehrani, Ha'iri-Yazdi, Esfahanian, & Safaei, 2013; Nguyen, Yoon, & Choi, 2009; Nwulu & Xia, 2017; Ravey, Roche, Blunier, & Miraoui, 2012; Ravey, Watrin, Blunier, Bouquain, & Miraoui, 2011; Riffonneau, Bacha, Barruel, & Ploix, 2011; Sheng, Li, Tsu, & Lehman, 2015; Sinoquet, Rousseau, & Milhau, 2011; Sobu & Wu, 2012; O. Sundström, Ambühl, & Guzzella, 2009)
	MINLP	Gestión	(Hernandez-Aramburo & Green, 2004; Stluka, Godbole, & Samad, 2011; X. Zhang, Sharma, & He, 2012)
	IP	Gestión	(Y.-H. Chen, Lu, Chang, Lee, & Hu, 2012)
	LP	Gestión	(Majic, Krzelj, & Delimar, 2013; Quiggin, Cornell, Tierney, & Buswell, 2012)
	MPDP	Gestión	(Huang et al., 2012)
	NSGAII	Gestión	(Di Silvestre, Graditi, & Riva Sanseverino, 2014)
	Simulation Accouting	AMBAS	(Borghetti et al., 2007; Celli, Pilo, Pisano, & Soma, 2005; Chakraborty & Simões, 2005; Chakraborty & Simoes, 2008; Chakraborty, Weiss, & Simões, 2007; Fan, Rimali, Tang, & Nayar, 2012; Farahmand, Khandelwal, Dai, & Shokooh, 2011; Hristiyan Kanchev et al., 2011; Kumaravel, Ashok, & Balamurugan, 2012; Menniti, Pinnarelli, & Sorrentino, 2009; Mohammadi, Mozafari, Solimani, & Niknam, 2013; Nayar, Tang, & Suponthana, 2008; Su, Yuan, & Chow, 2010)
	Teoría de Juego	Gestión	(Faisal A. & Heikki N., 2011)
	EA	Dimensionado	(Logenthiran et al., 2010)
	GA	AMBAS	(C. Chen, Duan, Cai, Liu, & Yin, 2009; Mohamed & Koivo, 2012; Obara & El-Sayed, 2009; Tafreshi, n.d.)
	SA	Dimensionado	(Yang, Pei, & Qi, 2012)
	PSO	AMBAS	(H. Kanchev et al., 2012; Kyriakarakos, Dounis, Arvanitis, & Papadakis, 2012; Mohamed & Koivo, 2010; Navaeefard, Tafreshi, Barzegari, & Shahrood, 2010)
	VACCINE-AIS	Gestión	(Tan, Xu, & Panda, 2013)
	MADS	Gestión	(Mahmoud, Habibi, & Bass, 2012; Mohamed & Koivo, 2012)
	MGSA	Gestión	(Niknam, Golestaneh, & Malekpour, 2013)
Heurísticos y Metaheurísticos	AMFA	Gestión	(Mohammadi et al., 2013)
	GSA	Gestión	(Niknam et al., 2013)

	SCSS	Gestión	(Niknam et al., 2013)
	BFA	Gestión	(Vahedi, Noroozian, & Jalilvand, 2010)
	CHASE	Gestión	(Lu, Tu, Chau, Chen, & Lin, 2013)
Nota: Adaptado de (Chauhan & Saini, 2014)			

Tabla 4.

Referencias enfoque de optimización aplicadas a las etapas de dimensionado y/o gestión de energía

<i>Método</i>	<i>Principal problema de diseño</i>	<i>Referencias</i>
<i>Mono-Objetivo</i>	Dimensionado de generación	(S. X. Chen et al., 2012; Han et al., 2013; Litchy et al., 2012; Logenthiran et al., 2010; Marnay et al., 2007; Vafaei & Kazerani, 2011)
	Dimensionado de almacenamiento	(Augustine et al., 2012; Bahramirad, Reder, & Khodaei, 2012)
	Gestión de energía	(Y.-H. Chen et al., 2012; Hernandez-Aramburo & Green, 2004; Huang et al., 2012; Majic et al., 2013; Mohamed & Koivo, 2010; Nguyen et al., 2009; Quiggin et al., 2012; Sobu & Wu, 2012; Stluka et al., 2011; X. Zhang et al., 2012)
<i>Multi-Objetivos</i>	Dimensionado de generación	(Fan et al., 2012; Farahmand et al., 2011; Kumaravel et al., 2012; Menniti et al., 2009; Nayar et al., 2008; Su et al., 2010)
	Dimensionado de almacenamiento	(Menniti et al., 2009)
	Gestión de energía	(Borghetti et al., 2007; Celli et al., 2005; Chakraborty & Simoes, 2005; Chakraborty & Simoes, 2008; Chakraborty et al., 2007; Faisal A. & Heikki N., 2011; Farahmand et al., 2011; Hristiyan Kanchev et al., 2011; Mohammadi et al., 2013; Niknam et al., 2013)
<i>Heurísticos</i>	Dimensionado de generación	(Logenthiran et al., 2010; Tafreshi, n.d.; Yang et al., 2012)
	Dimensionado de almacenamiento	(Navaeefard et al., 2010)
	Gestión de energía	(H. Kanchev et al., 2012; Lu et al., 2013; Mahmoud et al., 2012; Mohamed & Koivo, 2010, 2012; Mohammadi et al., 2013; Niknam et al., 2013; Tan et al., 2013; Vahedi et al., 2010)

Nota: Adaptado de (Chauhan & Saini, 2014)

Referente a la integración de las etapas de dimensionamiento y gestión de energía en el D&P de un SEH, que es el tema de enfoque en este estudio, se encuentra en la literatura el trabajo de (Kim & Peng, 2007), quienes aplican la integración de las etapas en D&P para VEH con SAE compuestos por PC y BAT; desarrollan el dimensionamiento bajo cadenas de Markov, mientras

realizan la gestión de energía a través de DP. En (Sorrentino et al., 2013) propusieron una metodología donde el objetivo fue desarrollar alto desempeño a costo efectivo de un sistema de PC para VEH (trenes); para el dimensionado se basaron en los modelos y restricciones de masa, costos, longitudinal del VEH, eficiencia de las PC y el banco de BAT empleando DP; para la gestión se basa en serie de administración basadas en reglas; prueban además que la herramienta matemática integrada garantiza efectividad y alto desempeño sin importar la tipología de los VEH, especificaciones y destino de uso, proponiendo un caso de estudio y comparándolo con otras investigaciones activas en el campo.

(Di Silvestre et al., 2014) propone integrar las etapas en un único problema de optimización multi-objetivo, el cual cuenta con una capa interna, dedicada a la gestión y una capa externa, dedicada al dimensionamiento de las SG. En el interior actúa un algoritmo NSGAI el cual proporciona en una trama de tiempo, conjuntos de soluciones denominadas “no óptimas” donde cada solución reduce pérdidas anuales de energía, consumo de combustible anual y emisiones de Dióxido de Carbono -CO₂- anuales; para la capa externa se empleó un algoritmo GSO, el cual proporciona la capacidad de generación de cada SG y de almacenamiento del SAE en un vector, que posteriormente se usa como función objetivo que utiliza la n-ésima solución de la capa interna para la resolver la SEH especificada por este vector.

En el trabajo (Zhao et al., 2014) proponen la integración de las etapas de dimensionado y gestión de energía D&P de una microrred real en China que opera en modo aislado; para la gestión proponen una estrategia operando en 3 modos (estados) que dependían del SOC de los SAE y basado en reglas; mientras que para el dimensionado emplearon una optimización multi-objetivo, basada en GA. Mientras en (Araújo, De Castro, Pinto, Melo, & Freitas, 2014) presentan la

combinación de las etapas de D&P aplicada a VEH empleando BAT y SC como SAE; el dimensionamiento se realizó basados en filtros y también con gestión óptima; presentan las ventajas de la hibridación de las etapas en el proceso de D&P.

También se han revisado algunas tesis de grado relacionadas con la temática. En su tesis doctoral (D. Zhang, 2013) propone el mejoramiento del D&P de una microrred usando métodos de PI; emplea enfoques tal como el de juego de la teoría, MINLP, MILP como técnicas de mejoramiento. (Muñoz, 2012) en su tesis doctoral presenta una metodología para el desarrollo de D&P de una microrred en el contexto de una zona no interconectada -ZNI- de Colombia; emplea información que es requerida por HOMER para simular una específica ZNI e identifica las mejores configuraciones de la etapa de dimensionado y selección del sistema analizando del Costo De Red Presente del costo del ciclo de vida del proyecto, el cual fue definido a 25 años; además, desarrolla un análisis sensitivo.

Otra tesis doctoral, (Luu, 2015), plantea las estrategias de control y gestión para una microrred eléctrica; parten del dimensionamiento, pasan por la estrategia de gestión y terminan con el control, donde formulan modelos, restricciones y técnicas de optimización. Un trabajo de maestría, presentado en (Martín & Isabel, 2013), formula una metodología de operación y gestión energética de una termoeléctrica que, a partir de una configuración energética dada, opera los subsistemas de generación para satisfacer la demanda del distrito y maximizar el beneficio del operador, considerando el mercado de la energía y emisiones de CO₂; la metodología fue implementada en el programa STELLA.

A continuación, en la tabla 5 se muestra un resumen de las herramientas computacionales comerciales que hay en la actualidad en el mercado para realizar un análisis de D&P de un SEH.

Como dato a destacar es que ninguna de las herramientas integra las etapas de Dimensionamiento y Gestión de Energía en un D&P, por ende, las desarrollan de manera independiente.

Tabla 5.

Herramientas computacionales comerciales empleadas para la D&P de SEH

<i>Software</i>	<i>Desarrollador</i>	<i>Entradas</i>	<i>Salidas</i>	<i>Resumen</i>
HOMER	National Renewable Energy Laboratory (NREL)	Demanda de carga, datos de generación, componentes de costo, limitantes, Sistema de control y datos de emisiones	Costo presente de red, de la energía y del capital; cargas no cubiertas, exceso de energía, consumo de combustible, fracción de energías renovables	Modela el comportamiento físico de un sistema integrado y su coste del ciclo de vida. Compara diversas configuraciones de diseño sobre la base de sus méritos técnicos y económicos. No permite al usuario seleccionar los componentes apropiados del sistema
HYBRID2	Renewable Energy Research Laboratory (RERL) of the University of Massachusetts	Demanda de carga, datos de generación, datos de los componentes del Sistema, datos financieros	Análisis técnico, dimensionado optimizado, evaluación financiera	De alta precisión con pasos de tiempo de simulación que varían de 10 min a 1 h. Requiere datos a largo plazo para el análisis económico del sistema integrado
HOGA	Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Zaragoza	Limitantes, datos de generación, datos de componentes, datos económicos	Optimización MO, emisiones en el ciclo de vida, análisis probabilístico, análisis de venta y compra de energía	Problemas de optimización SO y MO y estrategias de control se resuelven mediante GA. Todos los parámetros se mantienen constantes durante la simulación de intervalo de 1h
HYBRIDS	Solaris Homes	Datos de carga promedio diaria, datos ambientales por cada mes del año	----	Herramienta de aplicación basada en hoja de cálculo de Excel para la evaluación de energía renovable. Se simula una sola configuración a la vez, pero es amplia en términos de las variables del sistema de energía renovables
TRNSYS	University of Wisconsin-Solar Energy Lab, Centre Scientifique et Technique du Batiment, TRANSSOLAR Energietechnik	Datos meteorológicos, modelos de componentes de una librería propia	Simulación dinámica, comportamiento de un sistema energético eléctrico y térmico	Utiliza un paso de tiempo programador definido que varía de 0,01s a 1h para la simulación. Se utiliza ampliamente para simular aplicaciones de energía solar, edificios convencionales y procesos biológicos

RETScreen	Ministerio de recursos naturales de Canadá	Bases de datos climáticos, del proyecto, del producto e hidrología	Análisis técnico, financiero y ambiental, de riesgo y sensitivo, eficiencia energética y cogeneración	Herramienta de análisis de proyectos de energía basada en Microsoft Excel que determina la viabilidad técnica y financiera del sistema integrado. No tiene en cuenta el efecto de la temperatura para análisis de rendimiento de los PF
------------------	--	--	---	---

Nota: Adaptado de (Chauhan & Saini, 2014)

Tabla 6.

Ventajas y desventajas de varias técnicas de optimización y herramientas computacionales

<i>Técnicas / Herramientas</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
AI	Encuentra el óptimo global de la configuración del sistema con relativa simplicidad computacional	----
Multi-Objetivo	Puede optimizar simultáneamente como mínimo 2 objetivos en conflicto	----
Iterativa	Fácil de programar	Incrementan el esfuerzo computacional y soluciones “no-óptimas”
Probabilística	Elimina la necesidad de datos cronológicos	No puede representar la dinámica del sistema para evaluar su desempeño
HOMER	Fácil de usar y adecuado para pre-viabilidad, optimización y análisis de sensibilidad.	No se puede permitir que el usuario seleccione de forma intuitiva los componentes apropiados del sistema.
HOGA	Optimiza problemas SO o MO con GA, opción por análisis de sensibilidad, requiere menos tiempo Exhaustivo en términos de variables de optimización por lo que requiere un conocimiento más alto grado de configuraciones del sistema.	El análisis de probabilístico y sensitivo no están incluidos. Puede simular hasta de una carga diaria de 10 kWh
HYBRIDS		Solo simula una configuración a la vez
HYBRID2	Fácil de usar, disponibilidad de la opción de despacho, bastantes opciones de carga eléctrica.	Requiere datos a largo plazo para un mejor rendimiento y análisis económico del sistema híbrido. Tiene acceso limitado a los parámetros y es falta de flexibilidad
TRNSYS	Flexible para simular el comportamiento transitorio del sistema integrado.	No puede simular energía nuclear, de olas, de mareas e hídricas.
RETscreen	Basada en Excel, fuerte base de datos meteorológicos	No hay opciones de entrada de datos, opciones limitadas para funciones de recuperación, búsqueda y visualización.

Nota: Adaptado de (Chauhan & Saini, 2014)

Mientras la tabla 6, muestra una comparación entre las técnicas de optimización empleadas para D&P de SEH con las herramientas computacionales existente en la actualidad para el desarrollo de D&P, mostrando las ventajas y desventajas entre estos.

2.3 Planteamiento del problema

Esta investigación está enfocada sobre las etapas de dimensionamiento y gestión de energía en el proceso de D&P de un SEH, donde se analizará la influencia de una gestión de energía óptima en el proceso de dimensionado.

Por lo tanto, se propone un algoritmo que implemente la etapa de gestión de potencias y despacho óptima entre SG, SAE y Carga. Con esos resultados se integra a la etapa de dimensionamiento para la selección de las capacidades de los SG y SAE, para que finalmente se pueda evaluar la influencia de esta integración, implementándola a través de simulaciones de un proceso de D&P de un SEH en un par de casos de estudio específicos:

- Caso I: Un VEH, con una configuración compuesta por SC-PC.
- Caso II: Una nanored eléctrica aislada, ubicada geográficamente en Colombia con una configuración compuesta por PFV-BAT-GD.

Se presenta la metodología empleada para la integración de las etapas de manera general y las técnicas de optimización para resolver el problema multi-objetivo en cada etapa.

2.3.1. Metodología del proceso de D&P

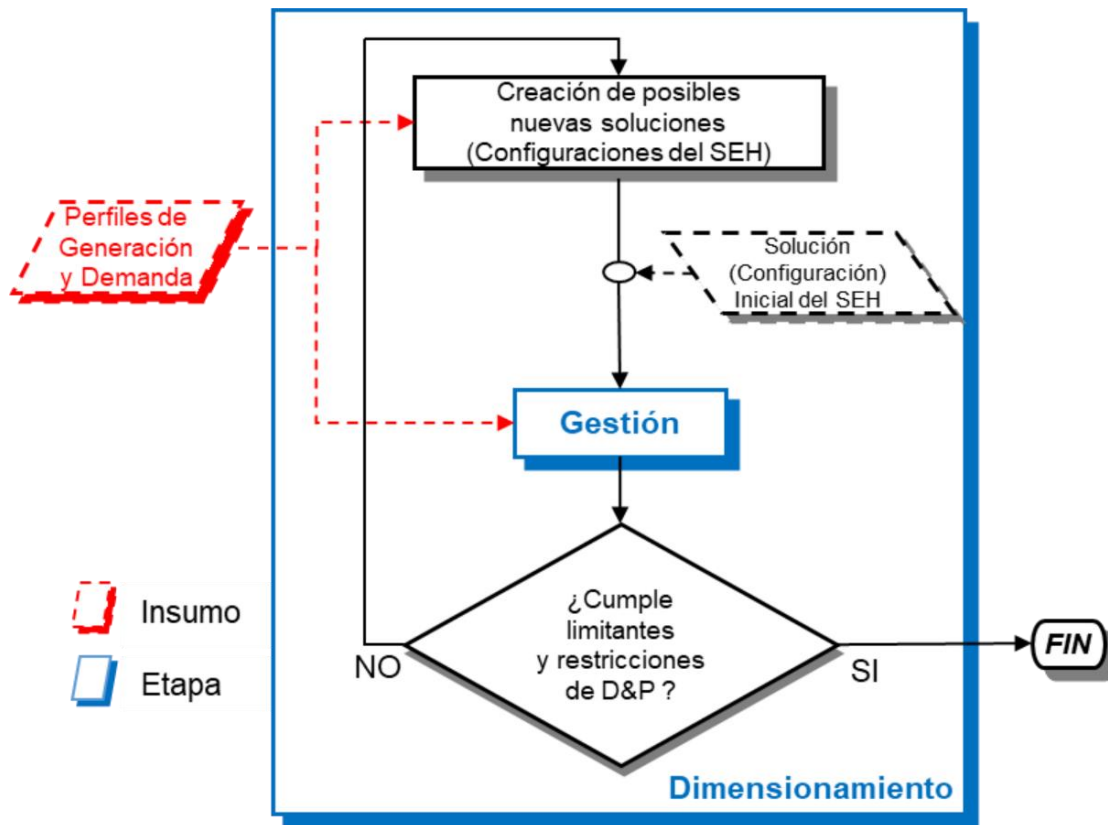


Figura 1. Esquema propuesto para la integración de las etapas de dimensionamiento y gestión de energía para el D&P de un SEH.

La metodología que tradicionalmente se ha usado en el proceso D&P de SEH propone un proceso secuencial, lo cual significa, referente a las etapas de dimensionamiento y gestión de energía, que primero se dimensionan las SG y el SAE con base en valores promedios de energía y no para todo tiempo t , para luego ejecutar la estrategia de control necesaria para gestionar la energía y distribuir las potencias de los SG en la SEH, esto quiere decir, que para la etapa de dimensionado se considera una operación basada en valores promedios, cuando debería ser basada en el valor de potencias designadas para cada instante de tiempo, lo que se acercaría más a la realidad.

Al integrar las etapas de dimensionamiento y gestión de energía en un proceso de D&P de un SEH, tal y como es el enfoque de esta investigación, se deberá cambiar la metodología un poco, y ahora para el desarrollo de la etapa de dimensionado, se tendrá en cuenta la estrategia de gestión y su distribución de potencia para todo tiempo t , es decir, habrá una capa interna que desarrolla la estrategia de gestión y una capa externa que desarrolla el dimensionamiento, dependiendo de si la familia de soluciones aportada en el dimensionamiento cumple con dicha distribución de potencias. La figura 1 muestra el esquema propuesto para la formulación de este tema de investigación.

2.3.2. Gestión de Energía a través de Programación Dinámica -DP-

Para la etapa de gestión de energía se planteó un algoritmo basado en una técnica de optimización llamada *Programación Dinámica -DP-* Esta técnica permite resolver problemas mediante una secuencia de decisiones, con la posibilidad de encontrar el óptimo global de la función a evaluar. Como propiedad, DP, subdivide el problema de optimización y lo transforma en subproblemas, con base en el principio optimalidad de Bellman: “*Cualquier subsecuencia de decisiones de una secuencia óptima de decisiones que resuelve un problema, también debe ser óptima respecto al subproblema que resuelve*” (R. E. Bellman, 1955).

De esta forma, DP fragmenta el problema general en subproblemas, encuentra las soluciones óptimas de esos subproblemas dependiendo de los objetivos que se quieran optimizar y crea un almacenamiento de estas. Luego, junta esas soluciones secuenciales de tamaño creciente facilitando la solución del problema general, evitando explorar todas las secuencias posibles, teniendo en cuenta solo las combinaciones que contengan soluciones de los subproblemas.

Para poder aplicar esta técnica, se deben conocer todas las futuras perturbaciones y entradas de las referencias. En este sentido, esta solución no es causal, por lo que no puede ser implementada en aplicaciones de tiempo real, sin embargo, esta solución óptima es muy útil, ya que se puede utilizar como un punto de referencia con el que se pueden comparar todos los otros controladores causales (Olle Sundström & Guzzella, 2009). Los subproblemas expresarán en la función *estados* y dependerán de una función de *control*. Por estos motivos, sumado a que los perfiles de demanda y de generación son conocidos en nuestros casos de estudio, esta técnica se ajusta muy bien al alcance de los objetivos propuestos, además que ha sido implementado con éxito en problemas de optimización en gestión de energía en etapas de D&P de SEH tal como se evidencia en (Audio Pinto et al., 2017; Gu et al., 2014; Huang et al., 2012; H. Kanchev et al., 2012; Kim & Peng, 2007; Masih-Tehrani et al., 2013; Nguyen et al., 2009; Nwulu & Xia, 2017; Ravey, Roche, et al., 2012; Ravey et al., 2011; Riffonneau et al., 2011; Sheng et al., 2015; Sinoquet et al., 2011; Sobu & Wu, 2012; O. Sundström et al., 2009).

Matemáticamente los problemas de control óptimo en DP pueden ser descritos como (Olle Sundström & Guzzella, 2009):

$$\min_{u(t)} J(u(t)) \quad (1)$$

$$\dot{x}(t) = F(x(t), u(t), t) \quad (2)$$

$$x(0) = x_o \quad (3)$$

$$x(t_f) \in [x_{f,min}, x_{f,max}] \quad (4)$$

$$x(t) \in X(t) \ni \mathbf{R}^n \quad (5)$$

$$u(t) \in U(t) \ni \mathbf{R}^m \quad (6)$$

Sí la función de estados pertenece al espacio de *estados* (5), así como la función de control al espacio de *control* (6) entonces la función a optimizar será la función costo (1). Para esto es necesario conocer una función de estado futuro dependiente del estado presente y una señal de control (2), el valor inicial de la función de estados (3), el valor de estado final dentro de un rango mínimo y máximo (4). Así la función costo puede ser también descrita como:

$$J(u(t)) = G(x(t_f)) + \int_0^{t_f} H(x(t), u(t), t) dt \quad (7)$$

Donde $G(x(t_f))$ es el costo del estado final y $H(x(t), u(t), t)$ es el costo de cada estado o subproblema aplicando un control. La característica importante de considerar en problemas de control óptimo son las limitantes variantes en el tiempo sobre las entradas y los estados, la limitante del estado final y las ecuaciones de modelos variantes en el tiempo ya que en general son problemas difíciles de resolver, sin embargo estos problemas pueden ser resueltos implementando DP de Bellman (R. E. Bellman, 1955; Olle Sundström & Guzzella, 2009).

Para resolver problemas de control en el tiempo continuo, el modelo debe ser discretizado en el tiempo primero, que sería equivalente a crear los subproblemas, quedando el modelo del problema en tiempo discreto como:

$$x_{k+1} = F_k(x_k, u_k) \quad , \quad k = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (8)$$

Con variables de estado $x_k \in \mathbf{X}_k$ y la señal de control $u_k \in \mathbf{U}_k$.

Ahora, siendo $\pi = \{\mu_0, \mu_1 \dots \mu_{N-1}\}$ una función de control e implementando (3), la discretización de (7) quedaría:

$$J_{\pi}(x_0) = [g_N(x_N) + \phi_N(x_N)] + \left[\sum_{k=0}^{N-1} h_k(x_k, \mu_k(x_k)) + \phi_k(x_k) \right] \quad (9)$$

Donde el término $[g_N(x_N) + \phi_N(x_N)]$ representa el costo del estado final, compuesto por $g_N(x_N)$ que representa el costo final en (7) junto con $\phi_N(x_N)$, que es una función de penalidad adicional que puede ser usada para forzar una restricción en el estado final (4). El segundo término $[\sum_{k=0}^{N-1} h_k(x_k, \mu_k(x_k)) + \phi_k(x_k)]$, representa la suma de los costos de cada uno de los subproblemas restantes, donde $h_k(x_k, \mu_k(x_k))$ es el costo aplicando un control $\mu_k(x_k)$ en cada estado o subproblema x_k y $\phi_k(x_k)$ que es una función de penalización para cada estado para imponer las restricciones de estado en (5) para cada $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$. Entonces, la política de control óptima π^0 será la política que minimice a J_{π}

$$J^0(x_0) = \min_{\pi \in \Pi} J_{\pi}(x_0) \quad (10)$$

Donde Π es el conjunto de políticas de control válidas (Olle Sundström & Guzzella, 2009).

DP se caracteriza por tener dos etapas: Una llamada *backward* y otra *forward*. En la etapa *backward* se calcula las soluciones costo óptimas de cada subdivisión del estado o subproblema, evaluando (9) con los valores de control correspondientes, dado por el costo del estado final y por el argumento que minimiza el segundo término de (9) en cada nodo en el espacio discretizado de tiempo-estado al avanzando desde *el futuro hacia el pasado*, o sea, desde k_{N-1} a k_0 . Esta solución genera un mapa de señales de control donde podrá encontrar los valores óptimos (O. Sundström et al., 2009). En la etapa *forward*, conociendo ese mapa de señales de valores de control óptimo y comenzando desde el estado inicial x_0 , avanzando *del pasado al futuro* evaluando la función costo recorriendo la trayectoria de estados óptimos encontrados. El mapa de control óptimo solo dará

los puntos discretos en la cuadrícula de espacios de estado. La señal de control, por lo tanto, es interpolada cuando el estado actual no coincide con los puntos de la cuadrícula de estados (O. Sundström et al., 2009).

En definitiva, el resultado de la gestión óptima de energía es la distribución óptima de potencias entre SG y SAE del SEH cumpliendo las limitantes y restricciones deseadas. Para esta investigación, en la implementación del algoritmo de DP, se adaptó la función *dpm* desarrollada por la Universidad ETH de Zúrich, presentada en (Olle Sundström & Guzzella, 2009). Para profundizar en la técnica de optimización DP se recomienda consultar las referencias (Bertsekas, 2005; R. E. Bellman, 1955; R. Luus, 2000; O. Sundström et al., 2009; Olle Sundström & Guzzella, 2009).

2.3.3. Dimensionado a través de una Búsqueda Exhaustiva

La metodología de dimensionado fue basada en un algoritmo de búsqueda exhaustiva. La motivación para implementar una búsqueda exhaustiva es que solo se considera aquellas soluciones comerciales que existen y que cumplan con la distribución óptima de potencias generada en la capa anterior de gestión de energía. Por esta razón, un espacio de soluciones discreto es reducido comparado con un espacio continuo, por ende, el costo computacional no incrementa debido al número limitado de soluciones. Además, comparado con métodos heurísticos tales como GA, ANN, PSO, ACO, entre otros, la evaluación exhaustiva de soluciones garantiza un dimensionado óptimo.

En definitiva, en esta etapa se hace un barrido con todas las configuraciones de fuentes comerciales que se deseen evaluar, a la que a cada una de esas configuraciones se evalúa la

distribución óptima de potencia entre fuentes. Después de tener todos los perfiles de las configuraciones posibles, se realiza un proceso de selección de solución óptima, donde dependerá de la función objetivo que se desee evaluar.

3. Capítulo II

En este capítulo se presentará la implementación de la metodología propuesta en el proceso de D&P para la integración de las etapas de dimensionamiento y gestión de energía a través de un caso de estudio: Un Vehículo Eléctrico Híbrido -VEH- configurado con pilas de combustible -PC- y supercondensadores -SC-. El capítulo II se encuentra organizado de la siguiente manera: La sección II.1 presenta el problema, la sección II.2 una propuesta de solución. La sección II.3 muestra los modelos utilizados y la sección II.4 presenta un caso de estudio. Este caso de estudio fue presentado en *2018 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference -VPPC-* en la ciudad de Chicago (USA) y puede ser consultado en (Domínguez, Solano, & Jacome, 2018).

3.1 Presentación del problema

Los VEH con PC son una solución interesante para reducir la dependencia de hidrocarburos en el sector transporte. Sin embargo, los sistemas de PC presentan dinámicas limitadas en corriente y potencia. Los sistemas de PC pueden degradarse si son usados para suplir la demanda de potencia transitoria requerida por la carga. Además, las PC no pueden almacenar o recuperar energía en aplicaciones con frenado regenerativo. Las BAT o SC pueden ser una fuente complementaria a las PC. Ambas fuentes de energía podrían manejar las potencias transitorias, recuperar energía en el frenado y así ayudar a extender la vida útil de las PC.

Hay dos configuraciones para hibridar un sistema de PC con uno de SC. Una de ellas es por medio de una configuración pasiva conectada directamente, sin electrónica de potencia, las PC con los SC (Hinaje, Noiying, Thounthong, Raël, & Davat, 2011). Sin embargo, la implementación de un sistema de gestión de energía -EMS- no sería posible. Una configuración activa utiliza al menos un convertidor de potencia para conectar el banco de PC con el de SC (Thounthong, Chunkag, Sethakul, Davat, & Hinaje, 2009). El vehículo Honda FCX 2002 (Honda Motors, 2002) utiliza una configuración activa PC-SC para suministrar la potencia a la carga. El Hyundai Tucson (Hyundai Motors, 2014), el Honda Clarity (Honda Motors, 2016) y el Toyota Mirai (Toyota Motors, 2016) utilizan una configuración activa con PC-BAT. Este caso de estudio considera un VEH con fuentes PC-SC con una conexión activa y considerando los SC como la fuente de potencia debido a su alta densidad de potencia, alta eficiencia y una vida útil mayor a las comparadas con BAT (Khaligh & Li, 2010).

El dimensionado de una fuente híbrida compuesta por PC-SC consiste en determinar la capacidad de las PC y de los SC. La potencia de la PC determinada por el tamaño del apilamiento de la PC, mientras que la energía del sistema de PC es determinada por el tamaño del tanque de H_2 . Aquí, el objetivo es definir la potencia nominal del apilamiento de PC. El tamaño del sistema de SC es definido por el voltaje nominal y la capacitancia de las celdas del SC de manera individual y el número de celdas totales en un banco de SC. La energía y la potencia en el SC no son variables desacopladas, un sistema de mayor potencia conlleva claramente un sistema de mayor energía. Por el contrario, los sistemas PC se caracterizan por el desacople potencia (celdas) energía (tanque de almacenamiento).

El procedimiento de dimensionado propuesto considera un EMS para determinar la distribución de potencia y energía entre las fuentes PC y SC para un perfil de carga predeterminado. Diferentes soluciones podrían ser obtenidas si se consideran diferentes EMS. En una fuente híbrida PC-SC, diferentes EMS son implementados. Un EMS óptimo considera técnicas de optimización tales como DP (Z. Chen, Mi, Xu, Gong, & You, 2014; Hu, Murgovski, Johannesson, & Egardt, 2014; Larsson, Johannesson, & Egardt, 2015; Liu, Chen, Li, Shang, & Zhan, 2018; Uebel, Murgovski, Tempelahn, & Baker, 2018; Vinot et al., 2014) para determinar la distribución de potencia entre la PC y el banco de SC. Estos métodos son apropiados si el perfil de potencia objetivo es conocido con anticipación, como se explicó anteriormente. Sin embargo, en una operación real, esta información no estaría disponible. Un EMS basado en reglas (Dépature, Lhomme, Bouscayrol, Sicard, & Boulon, 2015; Dépature, Lhomme, Sicard, Bouscayrol, & Boulon, 2018; Ravey, Blunier, & Miraoui, 2012; Solano, Hissel, & Pera, 2018; Solano, Hissel, & Péra, 2014; Tani, Camara, & Dakyo, 2012; Trovao, Roux, Menard, & Dubois, 2017), tal como aquellos basado en FL, no requieren de un conocimiento del perfil de demanda de potencia, más sin embargo se requiere de cierta experiencia para definir las reglas. Además, las soluciones obtenidas con estos métodos no son necesariamente óptimos.

El EMS permite determinar la distribución de potencia que hay entre las fuentes de energía, Normalmente ante este tipo de configuraciones, la potencia del PC siempre es positiva, cuando alimenta tanto la carga como cuando recarga los SC. Mientras que la potencia de los SC es positiva cuando suministra de potencia a la carga y es negativa cuando recibe potencia de la PC o de la carga. La carga puede consumir potencia mientras se acelera o se maneja a una velocidad constante, así como puede generar potencia cuando frena (freno regenerativo). La distribución de potencia entre las fuentes y la carga es presentada en (11) e ilustrada en la figura 2.

$$P_{CARGA} = P_{PC} + P_{SC} \quad (11)$$

En donde P_{CARGA} es la potencia demandada por la carga, en este caso es el perfil de conducción previamente conocido, P_{PC} es la potencia que entrega la PC y P_{SC} es la potencia del banco de SC, donde es negativa en su proceso de carga y positiva al entregar potencia.

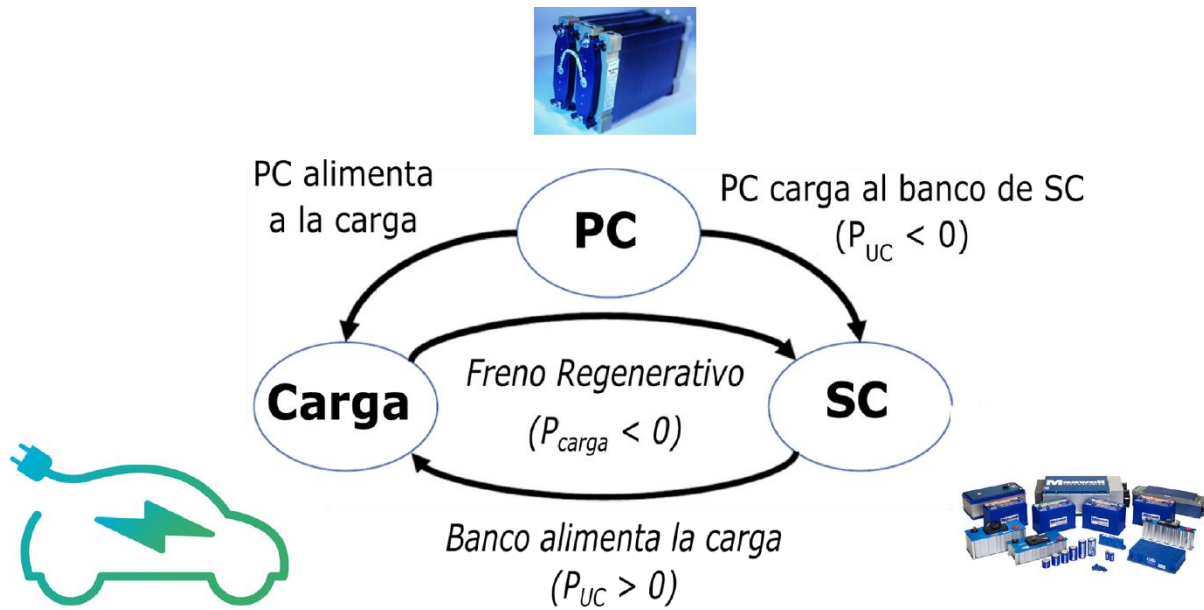


Figura 2. Distribución de potencias entre las fuentes PC-SC y la carga

La energía de la PC, e_{PC} , es determinada por la integral numérica de P_{PC} :

$$e_{PC} = \int_{t_i}^{t_f} P_{PC} dt \quad (12)$$

Para este caso de estudio, el EMS tiene el objetivo de minimizar la e_{PC} para un perfil de potencia dado, reduciendo el consumo de H_2 . La solución debe respetar restricciones específicas:

- La potencia suministrada por la PC es positiva y limitada
- La energía media suministrada por el banco de SC después de todo el período debe ser cero
- El SOC del banco de SC tiene límites superior e inferior

En donde las relaciones matemáticas de las restricciones son:

$$0 < P_{PC}(t) < P_{PC_{max}} \quad (13)$$

$$SOC_{SC}(t_0) = SOC_{SC}(t_f) \quad (14)$$

$$SOC_{SC_{min}} < SOC_{SC}(t) < SOC_{SC_{max}} \quad (15)$$

Donde $P_{PC_{max}}$ es el límite superior de P_{PC} , t_0 y t_f son los tiempos inicial y final respectivamente, y $SOC_{SC_{min}}$ y $SOC_{SC_{max}}$ son los límites superior e inferior del SOC_{SC} .

Para los fines de esta investigación, se presentará como un caso de estudio el D&P de un VEH, configurado con PC-SC como sus fuentes, realizando a su vez la integración de las etapas de optimización de gestión de potencia y dimensionamiento y analizar su influencia.

3.2 Propuesta de solución

3.2.1. Metodología

La metodología propuesta para este caso de estudio es una adaptación de la metodología general presentada en el inciso *I.4.i* y que fue mostrada en la figura 1. Esta adaptación es ilustrada a continuación en la figura 3.

Para un perfil predeterminado de potencia de la carga, la distribución de potencia óptima entre las fuentes se encuentra implementando diferentes EMS dependiendo de la configuración que tenga el VEH dependiendo del apilamiento de PC y SC. Al obtener este perfil distribución de potencia óptima entre fuentes, posteriormente se ingresa en la etapa de dimensionado, la cual es desarrollada e implementada con un algoritmo de búsqueda exhaustiva para hallar la respuesta

óptima de capacidades de las fuentes que cumplan ese perfil óptimo de distribución de potencia, que se encuentre entre las opciones que brindan comercialmente los fabricantes y que además cumpla con ciertas restricciones y/o limitantes específicas para cada caso de estudio.

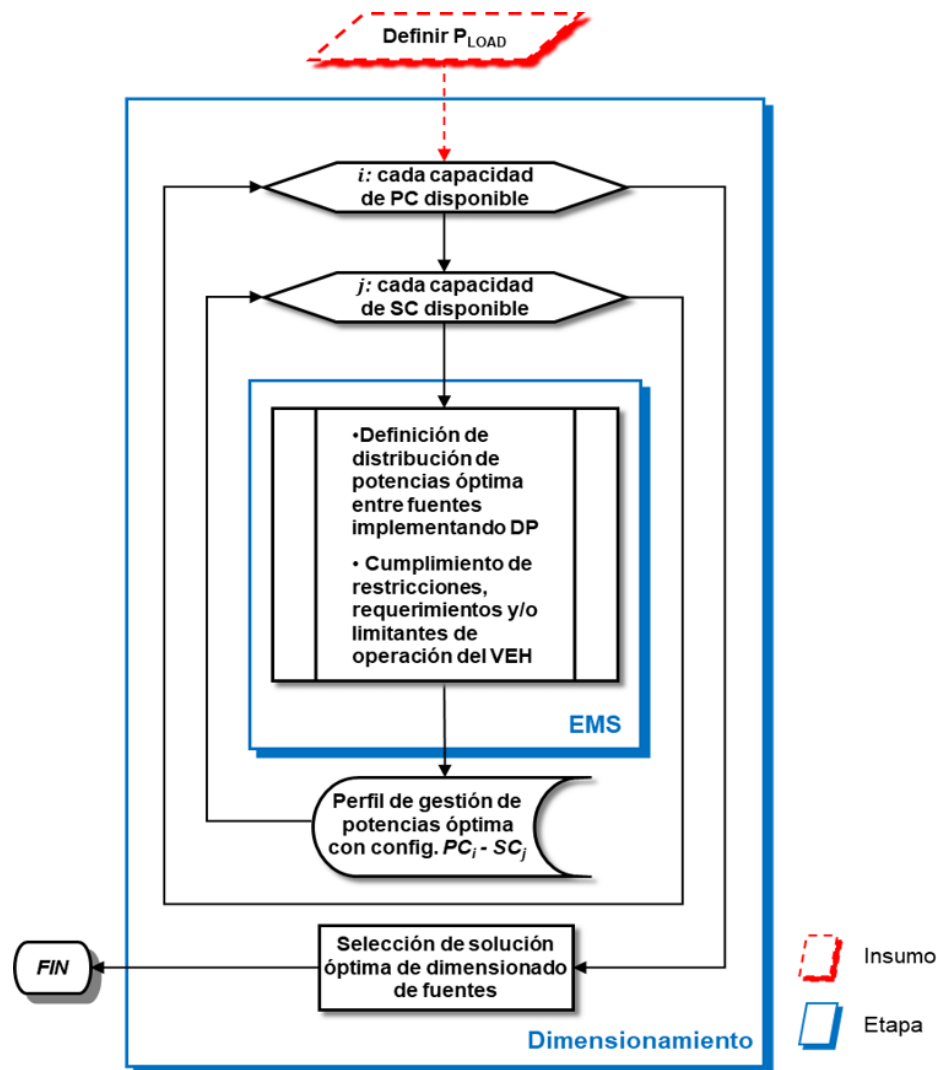


Figura 3. Metodología propuesta para integración de etapas en VEH con fuentes PC-SC

La metodología implementada nos permite evaluar la influencia del EMS en el dimensionado óptimo de una PC y un SC en un VEH con estas fuentes.

3.2.2. Sistema de Gestión de Energía -EMS- óptimo

En este caso de estudio se implementa un EMS óptimo, basado en la minimización de una función costo, la cual normalmente incluye consumo de combustible, así como el costo y degradación de las fuentes. Como se ha dicho anteriormente, esta distribución de potencias entre la PC y el banco de SC puede ser determinada por DP. Varios trabajos han implementado un EMS óptimo para VEH usando DP (Z. Chen et al., 2014; Larsson et al., 2015; Liu et al., 2018; Ravey, Blunier, et al., 2012; Ravey, Roche, et al., 2012; Ravey et al., 2011; Uebel et al., 2018; Vinot et al., 2014). La distribución de potencia entre la PC y el banco de SC es encontrada usando la función *dpm* desarrollada por la Universidad ETH de Zúrich, presentada en (Olle Sundström & Guzzella, 2009) con base en la ecuación de Bellman (Bellman, 1956), la cual es adaptada al caso de estudio.

3.2.2.1. Definición de variables. Para este caso de estudio, la función objetivo que se implementa en el algoritmo DP está enfocada a la reducción del consumo de H_2 por parte del apilamiento de PC, lo que puede ser equivalente a minimizar e_{PC} . Con base en (12), la función costo a optimizar es

$$J = \min \int_{t_i}^{t_f} \Delta H_2(u(t), t) dt \quad (16)$$

Que, en su versión discreta sería equivalente a

$$J \approx \min \sum_{k=0}^{k=N-1} e_{PC}(P_{PC}[k], k) * t_k \quad (17)$$

Donde, $\Delta H_2(u(t), t)$ es una función continua que representa el consumo de H_2 de la PC. Por lo que la función objetivo puede ser adaptada al algoritmo *dpm* como la minimización de $e_{PC}[k]$ para cada muestra k , como se muestra en (17).

Se tomó como *variable de estado* a SOC_{SC} y *variable de control* a P_{PC} y a través de estas, hallar el perfil de distribución óptimo de potencias entre fuentes presentado en (11). Para la implementación del algoritmo DP para hallar el EMS óptimo, puede ser adaptado y descrito matemáticamente como el problema de control óptimo de tiempo discreto junto con (17) y haciendo la analogía de (2) a (6) y cumpliendo las restricciones (13) a (15):

$$SOC_{SC}[k + 1] = SOC_{SC}[k] + \Delta SOC_{SC}[k] \quad (18)$$

$$SOC_{SC} [k_i = 0] = 90\% = SOC_{SC} [k_f = N - 1] \quad (19)$$

$$SOC_{SC}[k_f] \in [SOC_{SCf,min}, SOC_{SCf,max}] \quad (20)$$

$$SOC_{SC}[k] \in [40\%, 100\%] \quad (21)$$

$$P_{PC}[k] \in [0\%, 100\%] \quad (22)$$

Donde $SOC_{SC}[k + 1]$ es valor de estado futuro, $SOC_{SC}[k]$ es el estado actual, $\Delta SOC_{SC}[k]$ es el diferencial entre los estados, con $SOC_{SC} [k_i]$ y $SOC_{SC} [k_f]$ como sus valores iniciales y finales, $SOC_{SCf,min}, SOC_{SCf,max}$ como sus valores límites en el estado final, así como sus límites inferior y superior para la variable de estado $SOC_{SC}[k]$ tanto para la variable de control $P_{PC}[k]$ para todo tiempo discreto k .

La salida del algoritmo es un mapa de control óptimo (P_{PC}) válido para cada sub-estado del sistema (SOC_{SC}). Luego se recorre la trayectoria evaluando la función costo con los valores

óptimos de control y estados, para hallar el perfil de distribución óptimo de potencias que menos consumo de H_2 haya tenido.

3.2.3. Dimensionamiento integrado

Una metodología genérica es empleada para determinar el dimensionado de los SC y el de la PC en un HEV con PC-SC. Esta metodología considera como entradas un perfil de referencia de potencia demandada por el HEV, el cual es conocido con anticipación y las hojas de datos de PC y SC.

Para este caso de estudio, se hace un barrido con todas las configuraciones de fuentes comerciales que se deseen evaluar, tanto para PC como para SC. Para cada una de esas configuraciones, se evalúa con base a la distribución óptima de potencia entre fuentes hallada por el EMS, la función objetivo del dimensionado.

3.2.4. Evaluación de soluciones

Después de tener todos estos perfiles de distribución para las configuraciones PC-SC posibles, se realiza un proceso de selección de solución óptima. Los resultados de la simulación para cada capacidad de las fuentes PC-SC son evaluadas considerando sus especificaciones. Luego, el desempeño de las soluciones aceptadas es evaluado a través de una función objetivo, donde en este caso, el objetivo de dimensionado es la hallar la configuración de apilamientos de PC y el número de celdas de un banco de SC, que menos consumo de H_2 tenga dentro de un ciclo de conducción, donde se conoce la demanda de potencia requerido para cumplirlo.

3.3 Modelamiento

El consumo de energía de un VEH puede ser bien descrito usando un modelo cuasi-estático discreto en el tiempo (Olle Sundström & Guzzella, 2009). Esto es posible ya que el modelo cuasi-estático tiene bien definidas sus variables macroscópicas y en el que el sistema se encuentra en cada instante de tiempo en un estado infinitesimalmente cercano al estado de equilibrio, o sea, se puede asumir que el problema es estático. Es decir, las modificaciones ejercidas sobre el sistema por fuerzas externas, se idealizan como fuerzas que solo varían infinitesimalmente a lo largo de todo el proceso, por lo tanto, esta descripción idealizada permite definir una ecuación de estado para el sistema a lo largo de todo el proceso (Zemansky & Dittman, 1984), esto se adapta a la propuesta de solución que se implementa en esta investigación y que es aplicada en VEH y con la variable de estado SOC_{SC} . Las ideas de modelado pueden ser consultadas en (Guzzella & Onder, 2010; Guzzella & Sciarretta, 2013).

Para implementar la propuesta de solución presentada en la figura 3, se necesitan de los siguientes modelos matemáticos e insumos para lanzar los algoritmos de optimización para la gestión de potencia entre fuentes y el dimensionado que cumpla con el perfil de dicha distribución.

3.3.1. Insumos

Perfiles de potencia obtenidos de datos reales o por simulación usando ciclos de conducción predeterminados hacen parte de los insumos. Estos datos son implementados como entradas al algoritmo. Dependiendo del modelo seleccionado para la simular las fuentes, diferente información de las hojas de datos son requeridos.

3.3.2. Modelamiento de Pilas de Combustible -PC-

En un enfoque simplificado, la curva de eficiencia de la PC puede ser usada para determinar el consumo de H_2 para un determinado perfil de potencia requerido P_{PC} , ya que la curva de eficiencia de una PC puede emplearse como una función de su potencia de salida P_{PC} (Feroldi, Serra, & Riera, 2009). Como la potencia P_{PC} es la variable de control dada por (11), la función de consumo de e_{PC} puede ser descrita como

$$e_{PC}[k] = F(u[k], k) \quad (23)$$

Donde $F(u[k], k)$ es una función de interpolación realizada en el mapa de eficiencia de la PC, entre e_{PC} y P_{PC} . La curva de eficiencia normalmente es suministrada por el fabricante de la PC.

3.3.3. Modelamiento de Supercapacitores -SC-

También en un enfoque simplificado, la variable de estado SOC_{SC} y su variación ΔSOC_{SC} en una celda de SC, puede ser estimada con la capacitancia nominal C_{SC} del banco de SC y las eficiencias de carga o descarga para un determinado perfil de potencia de salida P_{SC} . Esto es,

$$C_{SC} = C_{SC_{por\ celda}} * \# \text{ celdas} \quad (24)$$

$$(cargando) \quad \Delta SOC_{SC}[k] = \frac{P_{SC}[k] * ef_{-c_{SC}}}{C_{SC}} \quad (25)$$

$$(descargando) \quad \Delta SOC_{SC}[k] = -\frac{P_{SC}[k] * ef_{-d_{SC}}}{C_{SC}} \quad (26)$$

Donde, la C_{SC} total del banco de SC será la capacitancia nominal de cada celda individual por el número de celdas apiladas que conformen el banco. Mientras que $ef_{c_{SC}}$ y $ef_{d_{SC}}$ son las eficiencias de carga y descarga de la celda de SC.

3.4 Caso de estudio

Como caso de estudio se plantea la integración de las etapas de dimensionado y gestión de energía para el D&P de un VEH configurado con PC-SC.

3.4.1. Topología

A continuación, se mostrará la topología para este caso de estudio en la figura 4.



Figura 4. Topología del caso de estudio del VEH con PC+SC

3.4.2. Implementación

La metodología propuesta es evaluada por simulación para determinar el dimensionado óptimo de un VEH configurado con PC-SC como fuentes y para un perfil de conducción real. El perfil de

conducción propuesto es el *New European Driving Cycle* -NEDC- adaptado, el cual es generalmente usado para determinar emisiones de CO₂, consumo de energía o la autonomía del VEH. Este perfil puede ser consultado en (Depature et al., 2016) y es presentado en la figura 5.

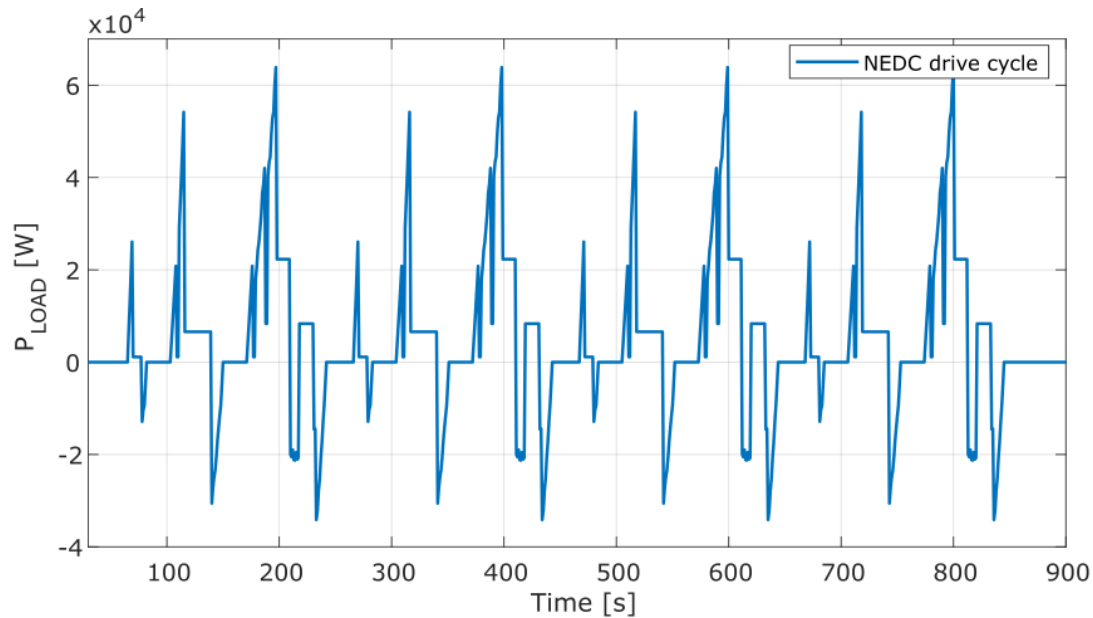


Figura 5. Perfil de conducción NEDC implementado en caso de estudio (Depature et al., 2016)

Se consideraron seis diferentes bancos de SC compuestos por 15, 20, 25, 30, 35 y 40 celdas cada uno. Cada celda de SC es de la serie *Maxwell K2*, con valores nominales de 3 V and 3000 F, capaz de almacenar 3.75 Wh cuando está totalmente cargada. Su hoja de datos puede ser consultada en (Maxwell Technologies, 2016).

La energía suministrada por la PC es evaluada para cada posible combinación entre las 2 PC y los 6 bancos de SC. La distribución de potencias óptima para cada una de las 12 combinaciones de soluciones consideradas es computada usando y adaptando la función *dpm* propuesta en (Olle Sundström & Guzzella, 2009). Su curva de eficiencia es presentada en la figura 6.

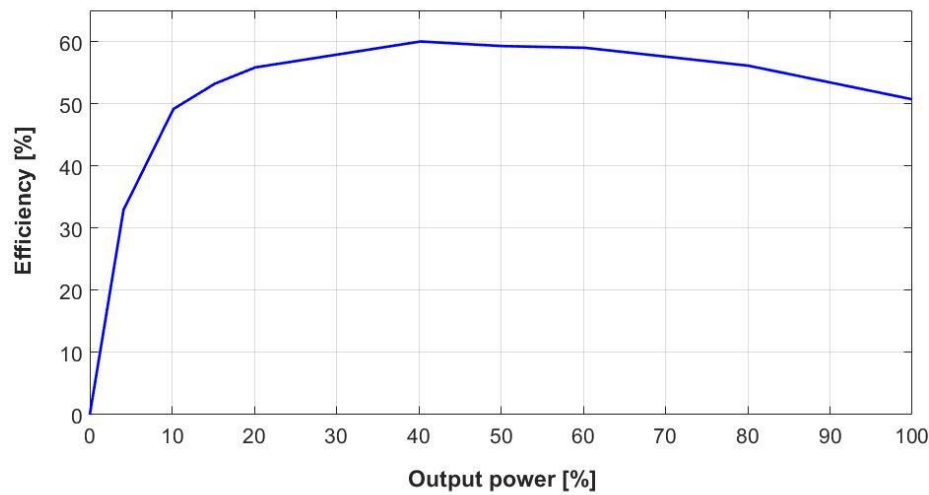


Figura 6. Curva típica de Eficiencia vs Potencia de salida de una PC (Feroldi et al., 2009)

3.4.3. Resultados

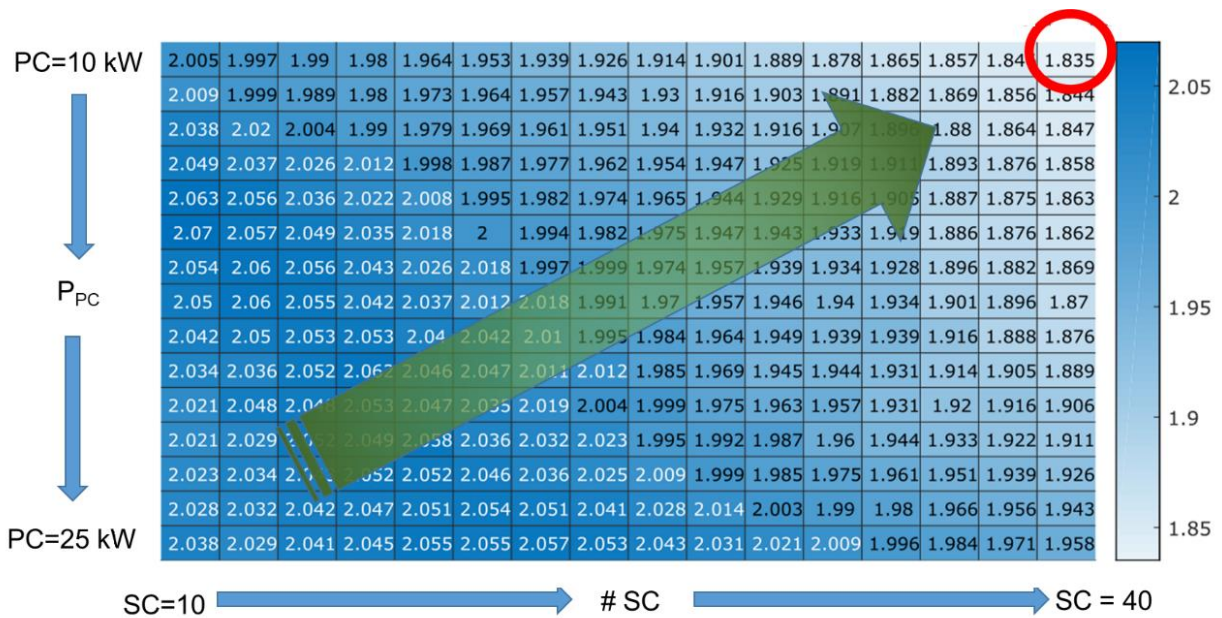


Figura 7. Mapa de calor que relaciona el consumo de energía una PC con el dimensionado de sus fuentes PC-SP para un proceso de D&P de un VEH

Al hallar las distribuciones de potencias óptimas de cada combinación posible, el consumo de e_{PC} puede ser determinado. La figura 7 es un mapa de calor que muestra la relación entre la e_{PC}

total consumida por cada ciclo de conducción por la PC, en función de la variación del número de celdas del banco de SC y su potencia nominal P_{PC} .

Como se puede apreciar en la figura 7, el consumo de energía por la PC tiende a disminuir a mayor número SC y a menor potencia nominal de la PC. Para este caso de estudio, el consumo mínimo de e_{PC} necesario para suplir el perfil de carga por ciclo de conducción fue de 1.835 kWh, el cual fue obtenido con una configuración de una PC de 10 kW y un banco de SC de 40 celdas.

La figura 8 presenta un zoom a la distribución de potencias óptima para la solución óptima de dimensionado con el objetivo de tener un menor consumo de energía por parte de la PC. Esto se obtuvo con la configuración $PC_{10kW} - SC_{40}$. Como era de esperarse, el EMS óptimo siempre intenta operar a la PC cerca de su máximo punto de eficiencia, el cual es del 60% de su potencia nominal como lo indica la figura 7, o sea, alrededor de 6 kW para la solución obtenida.

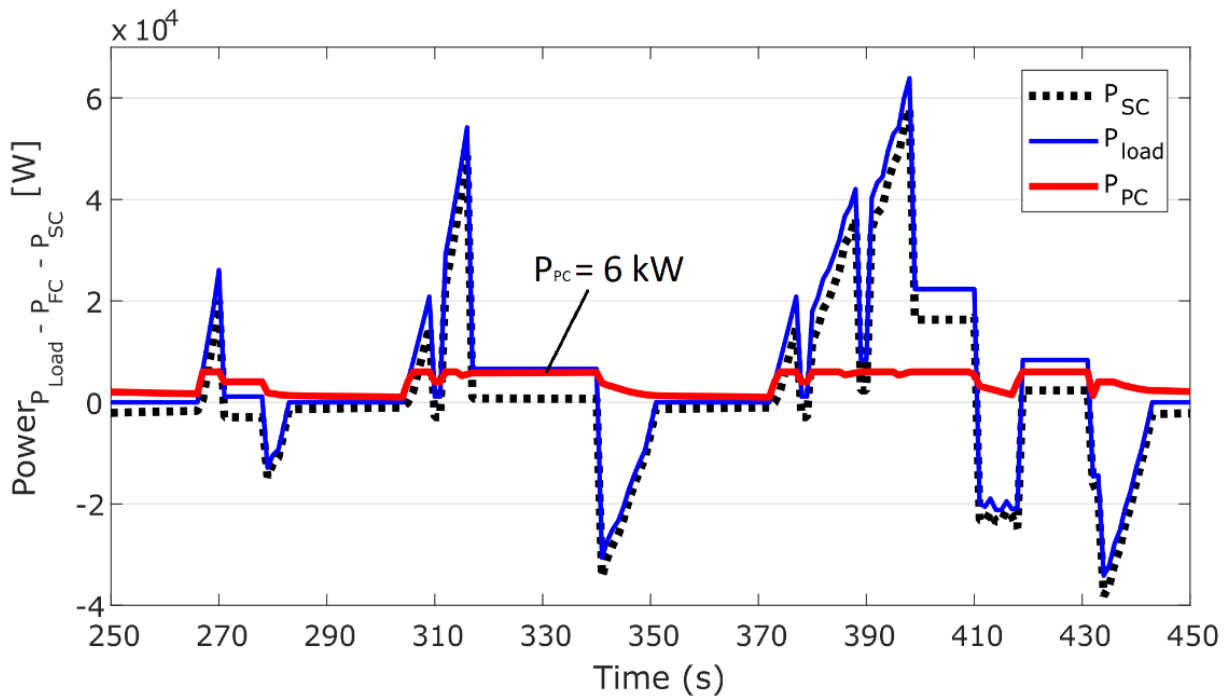


Figura 8. Distribución de potencias óptima para una configuración: PC = 10 kW - SC = 40 celdas

Con el objetivo de comparar el efecto de una distribución de potencias óptima -offline- y una causal basada en reglas -online-, se tomaron los resultados presentados en (Domínguez et al., 2018), en donde se desarrolló un algoritmo de gestión de energía en tiempo real basada en la técnica FL. Se evaluaron las configuraciones $PC_{15\text{ kW}} - SC_{40}$ y $PC_{20\text{ kW}} - SC_{40}$ bajo las mismas condiciones a excepción de la implementación de un EMS basado en reglas. La configuración que tuvo un menor consumo de e_{PC} por ciclo de conducción fue $PC_{20\text{ kW}} - SC_{40}$, con un total de 2.3719 kWh por ciclo. La figura 9 presenta la distribución de potencias de menor consumo de energía por ciclo de conducción implementando un EMS basado en reglas para la configuración $PC_{20\text{ kW}} - SC_{40}$.

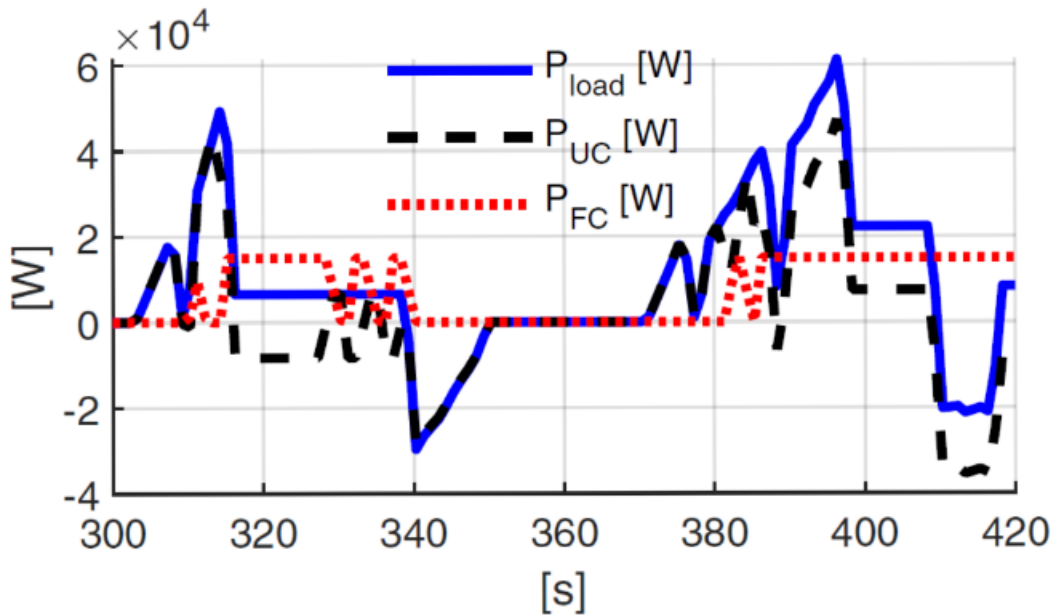


Figura 9. Distribución de potencia por un EMS basado en reglas para una configuración $PC = 20\text{ kW}$ y $SC = 40$ celdas.

La figura 10 muestra la comparación de e_{PC} consumida por la PC por ciclo de conducción cuando se implementa un EMS óptimo y otro causal.

Luego se presenta en la tabla 7 el resumen de los resultados de este caso de estudio comparando el desempeño de una gestión óptima con una gestión causal.

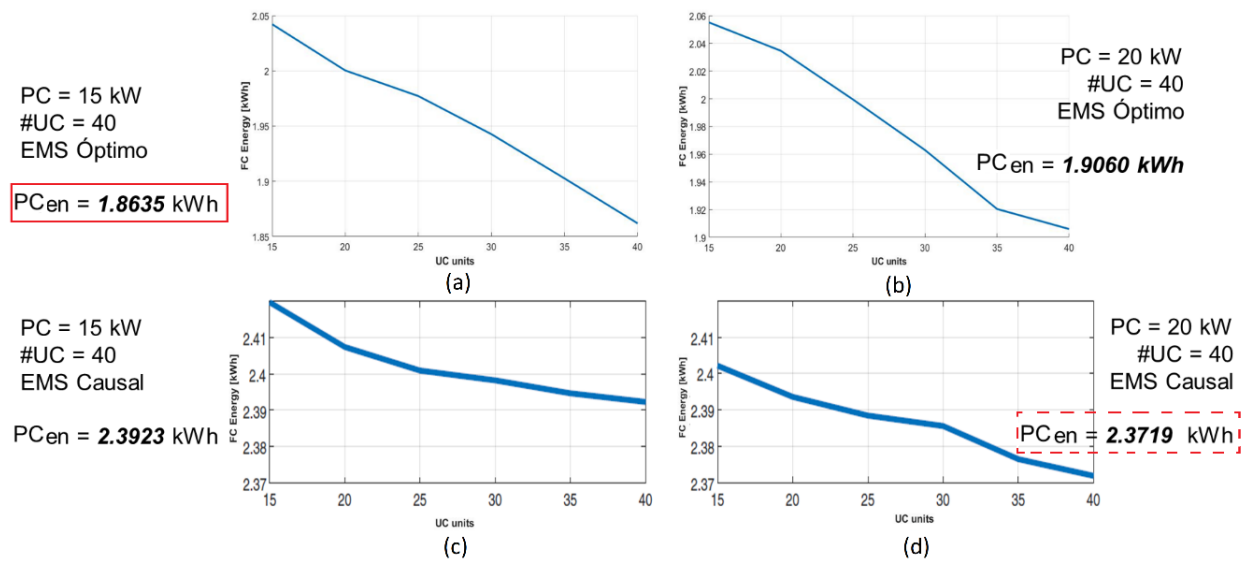


Figura 10. Consumo de energía por parte de la PC vs Dimensión del banco de SC para las configuraciones: a) PC_{15 kW} - SC₄₀ con EMS óptimo, b) PC_{20 kW} - SC₄₀ con EMS óptimo, c) PC_{15 kW} - SC₄₀ con EMS causal y d) PC_{20 kW} - SC₄₀ con EMS causal.

Tabla 7.

Resumen de resultados caso de estudio con VEH implementando un EMS óptimo y otro causal.

	PC _{15 kW}						PC _{20 kW}					
# SC	15	20	25	30	35	40	15	20	25	30	35	40
Consumo e_{PC} con EMS óptimo DP [kWh/Ciclo]	2.049	2.0	1.982	1.943	1.919	1.862	2.06	2.035	2.004	1.963	1.931	1.906
Consumo e_{PC} con EMS causal FL [kWh/Ciclo]	2.420	2.408	2.401	2.397	2.395	2.393	2.399	2.393	2.389	2.384	2.378	2.372
% de Optimización	18.11	20.4	21.14	23.42	24.75	28.52	16.45	17.59	19.22	21.45	23.15	24.51

3.4.4. Análisis de resultados

La búsqueda exhaustiva para todas las posibles combinaciones permite identificar el dimensionamiento óptimo de las fuentes PC-SC basado en la gestión de potencias óptima. En este

caso de estudio se puede corroborar la tendencia en el mapa de calor presentado en la figura 7, donde a mayor número de SC conformando el SAE y a una P_{PC} de funcionamiento cercana a su zona de máxima eficiencia. Mientras que implementando un EMS causal, la tendencia sigue siendo a mayor número de SC, menor consumo de energía como es de esperarse, pero a mayor P_{PC} nominal menor consumo.

De esta forma se halla en la configuración del SEH $PC_{10 \text{ kW}} - SC_{40}$ implementando un EMS óptimo, el mínimo consumo de e_{PC} . Este consumo fue de 1.835 kWh/ciclo. Mientras que el mínimo consumo de e_{PC} implementando un EMS causal es hallado con la configuración del SEH $PC_{20 \text{ kW}} - SC_{40}$, siendo este de 2.372 kWh/ciclo. Estos consumos mínimos se dan, independientemente de la PC, con un banco de SP de 40 celdas, cumpliendo de la tendencia explicada anteriormente. Comparando ambos resultados mínimos de consumo, se encuentra que la configuración $PC_{10 \text{ kW}} - SC_{40}$ implementando un EMS óptimo, tiene un menor consumo de 537 Wh/ciclo de conducción que la configuración $PC_{20 \text{ kW}} - SC_{40}$ implementando un EMS causal, esto es una optimización del 27.4% en el consumo de energía. Ahora bien, la influencia de la gestión óptima ayuda a optimizar la etapa de dimensionado, ya que con este caso de estudio puede observarse que, con base a un EMS óptimo se logró, además de disminuir el consumo de energía, diseñar la PC con una capacidad nominal de 10 kW, de menor dimensión que el diseño implementando un EMS causal, que es de 20 kW lo que se traduce en ahorro económico aún mayor.

Otra observación realizada, es como el EMS óptimo considera la eficiencia de la PC e impone una referencia de operación en la región de su mayor eficiencia, la cual lleva a la PC a operar cerca del 40% de su capacidad nominal, con una eficiencia máxima del 60%, tal como lo sugiere la curva

de eficiencia de la PC presentada en la figura 7. Esto puede apreciarse en la distribución óptima de potencias mostrada en la figura 8, donde con una configuración $PC_{10\text{ kW}}-SC_{40}$, el EMS óptimo opera la $PC_{10\text{ kW}}$ con una $P_{SC} = 6\text{ kW}$, el 60% de su potencia nominal, en la zona de máxima eficiencia.

Con un EMS basado en reglas no se considera la eficiencia de la PC, por ende, la PC opera en zonas de baja eficiencia como se muestra en la figura 9. Por este motivo, el consumo de energía es mayor que implementando un controlador óptimo. Como se puede notar en la figura 10, el consumo mínimo de energía se da con bancos de SC de 40 celdas, con la diferencia que el consumo mínimo de energía total se da con la configuración de la PC de 20 kW y no de 15 kW como cuando se implementa un EMS óptimo. Para la PC de 15 kW el consumo mínimo de energía fue 2.3923 kWh y para la PC de 20 kW fue 2.3719 kWh. Como se esperaba, teniendo las mismas configuraciones, los resultados de menor consumo de energía son implementando un EMS óptimo. En general, el dimensionamiento óptimo se da bajo la configuración $PC_{15\text{ kW}}-SC_{40}$ implementando un EMS óptimo.

4. Capítulo III

En este capítulo se presentará la implementación de la metodología propuesta en el proceso de D&P para la integración de las etapas de dimensionamiento y gestión de energía a través de un caso de estudio: Una nanored eléctrica aislada ubicada geográficamente en Colombia y configurada con paneles fotovoltaicos -PFV-, baterías -BAT- y generador diésel -GD-. El capítulo III se encuentra organizado de la siguiente manera: La sección III.1 presenta el problema, la sección III.2 una propuesta de solución. La sección III.3 muestra los modelos utilizados y la

sección III.4 presenta un caso de estudio. Este caso de estudio y sus resultados fueron presentados en la *Conferencia Internacional de Energía Sostenible -COIES-* en el 2017 en la ciudad de Bucaramanga, Colombia.

4.1 Presentación del problema

Para este estudio se analiza una nanored aislada configurada como un SEH constituido por un GD como fuente controlable, un arreglo PFV como fuente intermitente y un banco de BAT como el SAE. La distribución de potencia entre las fuentes y la carga se halla con la ecuación (27) y es ilustrada en la figura 11.

$$P_{CARGA} = P_{FV} + P_{GD} + P_{BAT} \quad (27)$$

En donde, P_{CARGA} es la potencia requerida por la carga y que en este caso es un perfil de demanda conocido, P_{FV} es la potencia que entrega el arreglo de PFV, P_{GD} es la potencia que entrega un GD y P_{BAT} es la potencia del banco de BAT, que es negativa en su proceso de carga y positiva al entregar potencia.

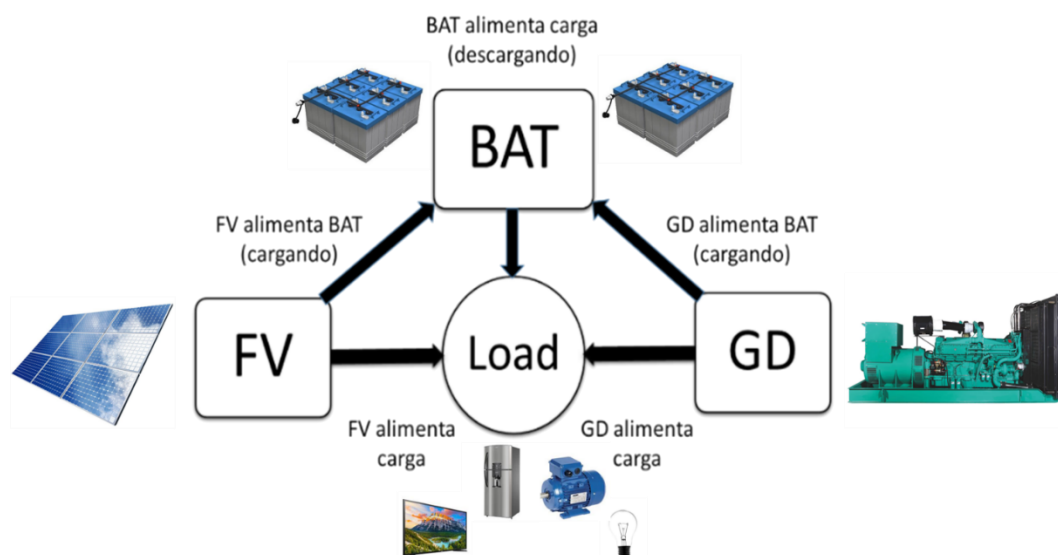


Figura 11. Distribución de potencias entre las fuentes PFV-GD-BAT y la carga

Para este caso de estudio la solución debe respetar restricciones específicas:

- La potencia suministrada por la PFV, DG es positiva y limitada
- La potencia suministrada por el banco de BAT la es limitada
- La energía media del banco de BAT después de un período debe ser cero
- El SOC del banco de BAT tiene límites superior e inferior

En donde las relaciones matemáticas de las restricciones son:

$$0 < P_{FV}(t), P_{DG}(t) < P_{FV_{max}}, P_{DG_{max}} \quad (28)$$

$$-P_{BAT_{max\downarrow}} < P_{BAT}(t) < P_{BAT_{max\uparrow}} \quad (29)$$

$$SOC_{BAT}(t_0) = SOC_{BAT}(t_f) \quad (30)$$

$$SOC_{BAT_{min}} < SOC_{BAT}(t) < SOC_{BAT_{max}} \quad (31)$$

Donde $P_{FV_{max}}$ y $P_{DG_{max}}$ son los límites superior de P_{FV} y P_{DG} respectivamente, $P_{BAT_{max\downarrow}}$ y $P_{BAT_{max\uparrow}}$ son los límites de potencia del banco de BAT de descarga y carga respectivamente, t_0 y t_f son los tiempos inicial y final respectivamente, $SOC_{BAT_{min}}$ y $SOC_{BAT_{max}}$ son los límites inferior y superior del SOC_{SC} .

Para los fines de esta investigación, se presentará como un caso de estudio el D&P de una nanored eléctrica aislada, compuesta por la hibridación PFV-GD-BAT como sus fuentes, realizando la integración de las etapas de optimización y de esta manera analizar la influencia de una de gestión óptima de flujos de potencia en un dimensionamiento óptimo.

4.2 Propuesta de solución

4.2.1. Metodología

La metodología propuesta para este caso de estudio es nuevamente una adaptación de la metodología general presentada en el inciso *I.4.i* y mostrada en la figura 1. Esta adaptación es ilustrada a continuación en la figura 12. La gestión de flujo de potencias se realizará con DP y el dimensionamiento se realizará con un algoritmo de búsqueda exhaustiva para hallar la respuesta óptima de capacidades de las fuentes que cumplan esos perfiles óptimos de distribución de potencia.

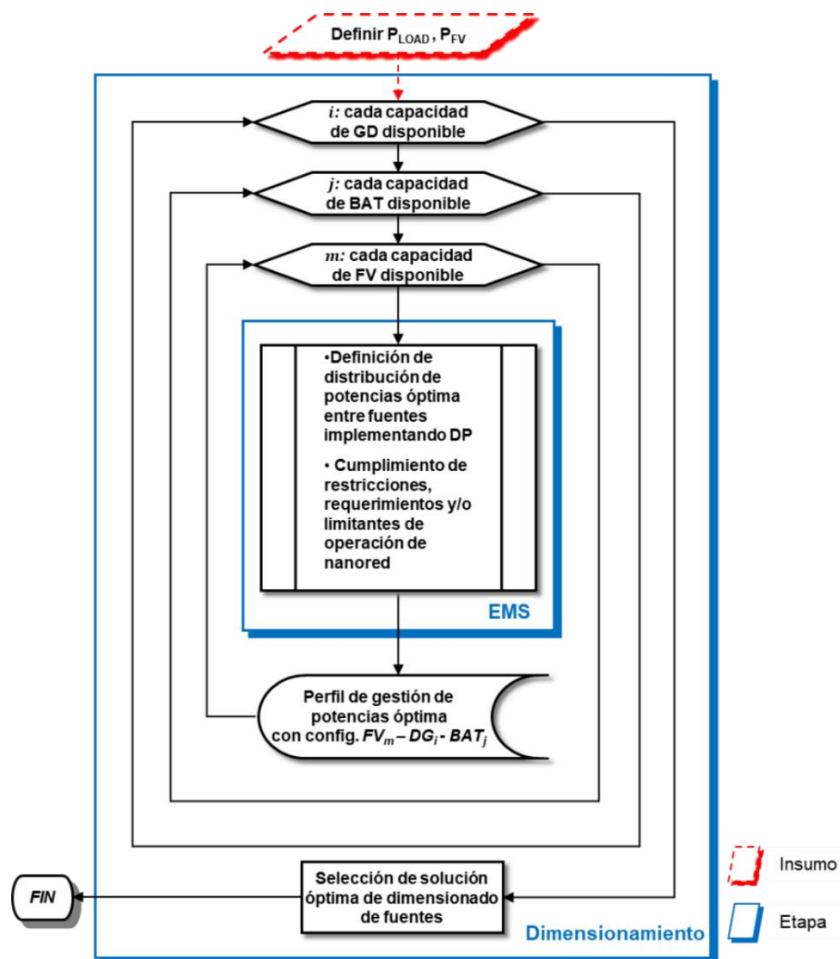


Figura 12. Metodología propuesta para integración de etapas en una nanored con fuentes PFV-GD-BAT

4.2.2. Sistema de Gestión de Energía -EMS- óptimo

Se implementa un EMS óptimo con el objetivo en la minimización de una función costo, que para este caso será el consumo de diésel. La distribución óptima de potencias es determinada por DP, en investigaciones como (B. C. Chen, Wu, & Tsai, 2014; Feroldi et al., 2009; Solano et al., 2018; Uebel et al., 2018; Vinot et al., 2014), entre otros, han implementado DP pat esta tapa, obteniendo buenos resultados. La implementación se hace por medio de la adaptación de la función *dpm* desarrollada por la Universidad ETH de Zúrich, presentada en (Olle Sundström & Guzzella, 2009).

4.2.2.1. Definición de variables. La función objetivo que se implementa en el algoritmo DP está enfocada a la reducción del consumo de diésel por parte del GD, que depende de la distribución de potencia de las otras fuentes y que puede ser equivalente a minimizar P_{DG} . Con base en esto, la función costo a optimizar es

$$J = \min \int_{t_0}^{t_f} \Delta Diesel(u(t), t) * dt \quad (32)$$

Que, en su versión discreta sería equivalente a

$$J \approx \min \sum_{k=0}^{k=N-1} \Delta Diesel(P_{GD}[k], ef_{GD}[k], k) * t_k \quad (33)$$

Donde, $\Delta Diesel(u(t), t)$ es una función continua que representa el consumo de diésel de la GD. Por lo que la función objetivo puede ser discretizada y adaptada al algoritmo *dpm* como la minimización de la función consumo de $\Delta Diesel$ para cada muestra k , la cual es dependiente de $P_{GD}[k]$ y la eficiencia del GD $ef_{GD}[k]$ como se muestra en (33).

Se tomó como *variable de estado* a la variable SOC_{BAT} y como *variable de control* a la variable P_{GD} . Con base en ellas se halla el perfil de distribución óptimo de potencias entre fuentes planteado en (27).

Para la implementación del algoritmo DP, este puede ser adaptado y descrito matemáticamente como el problema de control óptimo de tiempo discreto junto con (33) y haciendo la analogía de (2) a (6) y cumpliendo las restricciones (28) a (31):

$$SOC_{BAT}[k + 1] = SOC_{BAT}[k] + \Delta SOC_{BAT} \quad (34)$$

$$SOC_{BAT}[k_o] = 90\% = SOC_{BAT}[k_f] \quad (35)$$

$$SOC_{BAT}[k_f] \in [SOC_{BAT_{f,min}}, SOC_{BAT_{f,max}}] \quad (36)$$

$$SOC_{BAT}[k] \in [40\%, 100\%] \quad (37)$$

$$P_{GD}[k] \in [0\%, 100\%] \quad (38)$$

Donde $SOC_{BAT}[k + 1]$ es valor de estado futuro, $SOC_{BAT}[k]$ es el estado actual, $\Delta SOC_{BAT}[k]$ es el diferencial entre los estados, con $SOC_{BAT}[k_i]$ y $SOC_{BAT}[k_f]$ como sus valores iniciales y finales, $SOC_{BAT_{f,min}}, SOC_{BAT_{f,max}}$ como sus valores límites en el estado final, así como sus límites inferior y superior para la variable de estado $SOC_{BAT}[k]$ y la variable de control $P_{GD}[k]$ para todo tiempo discreto k .

La salida del algoritmo es un mapa de control óptimo, $P_{GD_{opt}}$, válido para cada sub-estado del sistema, SOC_{BAT} . Luego se recorre la trayectoria evaluando la función costo con los valores óptimos de control y estados, para hallar el perfil de distribución óptimo de potencias que menos consumo de diésel tenga.

4.2.3. Dimensionamiento integrado

De manera general e implementando una búsqueda exhaustiva, se hace un barrido realizando las diferentes combinaciones de las fuentes PFV, GD y BAT, conformando las diferentes configuraciones de nanored que se deseen evaluar. Para cada una de ellas, se evalúa la distribución óptima de potencia entre fuentes hallada por el EMS óptimo. Con los resultados obtenidos se realiza la evaluación de soluciones para determinar la solución óptima.

4.2.4. Evaluación de soluciones

Después de tener los perfiles de distribución de potencia óptimos para las configuraciones PFV-GD-BAT posibles, se realiza un proceso de selección de solución óptima. Los resultados de la simulación para cada capacidad de las fuentes son evaluados considerando sus especificaciones. Luego, el desempeño de las soluciones aceptadas es evaluado a través de una función multiobjetivo, que incluye componentes técnicas, económicas y ambientales. Con base en (IEEE Standard, 2019; Khatib, Mohamed, & Sopian, 2013; Logenthiran et al., 2010; Paliwal, Patidar, & Nema, 2014), las funciones para evaluar las configuraciones propuestas son:

- Costo Capital Inicial - C_I :- Estimación del costo inicial de inversión en las fuentes a usar.

$$C_I = \sum_{i=1}^N C_{f_i} * N_{f_i} \quad (39)$$

Donde, C_{f_i} es el costo capital unitario para cada componente i (\$), N_{f_i} es el número de fuentes de cada componente i (Paliwal et al., 2014).

- Costo de Operación $-C_{oper}-$: Estimación del costo asociado al costo anual de los combustibles a usar.

$$C_{oper} = \sum_{n=1}^{N_p} \frac{O_{GD}}{(1+r)^n} \left(\frac{FC}{H} (1+E_f)^n \right) \quad (40)$$

Donde, O_{GD} es el total de energía entregada por el GD (kWh/año), r es la tasa de descuento nominal, FC es el costo de un litro de combustible (\$/lt), E_f tasa de aumento del costo del combustible, n es el número de año y N_p son los años de vida útil del proyecto (Paliwal et al., 2014).

- Costo de Mantenimiento $-C_{man}-$: Estimación del costo anual asociado al mantenimiento de las fuentes a usar.

Donde, O_i es el total de la energía anual de cada componente i (kWh/año), α_{M_i-BAT} es el costo de mantenimiento por unidad (\$), E_{M_i} es la tasa de aumento del costo de

$$C_{man} = \left[\sum_i \sum_{n=1}^{N_p} O_i * \alpha_{M_i} \left(\frac{1+E_{M_i}}{1+r} \right)^n \right] + \left[\sum_{n=1}^{N_p} \frac{\alpha_{M_{BAT}} * N_{BAT} * C_{BAT}}{(1+r)^n} \right] \quad (41)$$

mantenimiento de cada componente i , N_{BAT} y C_{BAT} son el número de BAT del banco de almacenamiento y la capacidad unitaria de las BAT (kWh) respectivamente, r es la tasa de descuento nominal, n es el número de año y N_p son los años de vida útil del proyecto (Paliwal et al., 2014).

- Costo de Reemplazamiento $-C_r$:- Estimación del costo asociado a los reemplazos de fuentes si estas tienen menor vida útil que el tiempo total de la planeación.

$$C_r = \sum_i C_{r_i} \quad , \quad C_{r_i} = C_{f_i} N_{f_i} \sum_{m=1}^{N_{R_i}} \left(\frac{1 + E_{C_i}}{1 + r} \right)^{(m * L_i)} \quad \text{para } N_{R_i} > 0 \quad (42)$$

Donde, N_{R_i} es el número de reemplazamientos del componente i requeridos en la vida útil del proyecto, E_{C_i} es la tasa de aumento del costo capital de cada componente i , L_i es la vida útil en años de cada componente i , C_{f_i} es el costo capital unitario para cada componente i (\$), N_{f_i} es el número de fuentes de cada componente i y r es la tasa de descuento nominal (Paliwal et al., 2014).

- Costo asociado a la contaminación $-C_{pol}$:- Estimación de valor económico extra (o marginal) del impacto causado por la emisión de carbono. El objetivo es proporcionar una evaluación de los beneficios de la reducción de CO_2 . Esto a su vez facilita un análisis de costo / beneficio que pueden realizar los planificadores del sistema para evaluar los beneficios obtenidos por la reducción de carbono en comparación con las inversiones incurridas.

$$C_{pol} = \sum_{n=1}^{N_p} \frac{O_{GD} * C_E}{(1 + r)^n} \quad (43)$$

Donde, O_{GD} es el total de energía entregada por el GD (kWh/año), N_p son los años de vida útil del proyecto, r es la tasa de descuento nominal y C_E es el valor asociado a la penalidad por emisiones de CO_2 por cada unidad por energía producida (\$/kWh) (Paliwal et al., 2014). Este costo asociado puede ser semejante a un impuesto al carbono.

- Costo Total - C_T :- Es la sumatoria de los costos mencionados anteriormente, siendo la suma total de costos durante toda la vida útil del proyecto.

$$C_T = C_I + C_{oper} + C_{man} + C_r + C_{pol} \quad (44)$$

Donde C_T es la suma de los costos hallados de (39) a (43) (IEEE Standard, 2019).

- Costo Equivalente Anual - C_{EA} :- Es el costo total anualizado del proyecto.

$$C_{EA} = C_T * \left\{ \frac{r * \left(\frac{r}{100} + 1 \right)^{N_p}}{100 * \left[\left(\frac{r}{100} + 1 \right)^{N_p} - 1 \right]} \right\} \quad (45)$$

Donde, C_T es el costo total, N_p son los años de vida útil del proyecto y p es la tasa de interés (%/año) (IEEE Standard, 2019).

- Consumo de combustible - C_F :- Es el consumo de los combustibles usados.

$$T_F = \sum_i F_i * N_p \quad (46)$$

Donde, F_i es la función de consumo de combustible fósil anual por cada componente i (lt/año) y N_p son los años de vida útil del proyecto (IEEE Standard, 2019).

- Emisiones de poluciones - E_{pol} :- Estimación de emisiones de gases de efecto invernadero producidos durante la quema de combustible fósil.

$$E_{pol} = \sum_i P_i * N_p * \varphi_{pol_i} \quad (47)$$

Donde, P_i es la potencia óptima total entregada por cada componente i (kWh/año), N_p son los años de vida útil del proyecto y φ_{pol_i} es un coeficiente de emisiones producido por el tipo de combustible (gr/kWh) (IEEE Standard, 2019).

- Penetración de renovables - R_{ER} -: Proporción de potencia renovable generada sobre el total de la potencia demandada.

$$R_{ER} = \frac{E_{ER}}{E_T} * 100\% \quad (48)$$

Donde, E_{ER} es la energía total generada con energías renovables y E_T es la energía total generada.

4.3 Modelamiento

4.3.1. Insumos

Perfiles de potencia obtenidos de datos reales, por simulación o sintéticos pueden ser considerados como insumos. Estos datos son implementados como entradas al algoritmo propuesto. Para este caso de estudio serán insumos: P_{CARGA} , la irradiancia - G - y la temperatura ambiente - T_{amb} - en el área geográfica donde se instalará el arreglo de PFV. Dependiendo del modelo seleccionado para la simular las fuentes, diferente información de las hojas de datos son requeridos.

4.3.2. Modelamiento Paneles Fotovoltaicos -PFV-

El modelamiento de PFV tiene como objetivo simular la generación eléctrica del arreglo de PFV bajo ciertos parámetros, o sea P_{FV} y de esta forma aplicarlo en la ecuación de balance de potencias mostrado en (27). P_{FV} puede ser calculada por varios modelos analíticos, los cuales definen la relación entre la corriente y el voltaje del PFV, I_{FV} y V_{FV} , basadas en las características eléctricas del PFV. Para el modelamiento del PFV se implementó el modelo propuesto en (Tegani et al., 2013) y mostrado en (Solano et al., 2016). Este modelo incluye efectos de los niveles de G y temperaturas, tanto de operación del PFV como del ambiente. Como insumo es necesario conocer datos de G , ambientales y los parámetros del fabricante del PFV.

$$I_{mpp} = I_{SC} * \left\{ 1 - C_1 * \left[e^{\left(\frac{V_{max}}{C_2 * V_{OC}} \right)} - 1 \right] \right\} + \Delta I \quad (49)$$

$$V_{mpp} = V_{max} + \mu_{V,OC} * \Delta T \quad (50)$$

Donde I_{mpp} y V_{mpp} son la corriente y voltaje del PFV a su máxima potencia respectivamente, Por tanto la P_{FV} en su máxima potencia está dada por:

$$P_{FV_{mpp}} = I_{mpp} * V_{mpp} \quad (51)$$

con

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_{max}}{I_{SC}} \right) * e^{\left(-\frac{V_{max}}{C_2 * V_{OC}} \right)} \quad (52)$$

$$C_2 = \left(\frac{V_{max}}{V_{OC}} - 1 \right) * \left[\ln \left(1 - \frac{I_{max}}{I_{SC}} \right) \right]^{-1} \quad (53)$$

$$\Delta I = I_{SC} * \left(\frac{G}{G_{ref}} - 1 \right) + \mu_{I,SC} * \Delta T \quad (54)$$

$$\Delta T = T_C - T_{C,ref} \quad (55)$$

$$T_C = T_a + \left(\frac{NOCT - 20}{800} \right) * G_T \quad (56)$$

Donde, I_{max} , V_{max} son la corriente y voltaje máximos del PFV a condiciones de operación de referencia respectivamente, I_{SC} es la corriente de corto circuito del PFV, V_{OC} es el voltaje de circuito abierto del PFV, $\mu_{V,OC}$, $\mu_{I,SC}$ son los coeficientes de temperatura relacionados a V_{OC} y I_{SC} respectivamente, G es la irradiancia horaria sobre una superficie inclinada, G_{ref} es la irradiancia en condiciones de operación de referencia igual a 1000 W/m^2 , T_C es la temperatura de operación del PFV, $T_{C,ref}$ la temperatura a condiciones de operación de referencia igual 25°C y T_a es la temperatura ambiente del sitio en consideración, NOCT la temperatura de celda a una operación normal, la cual es definida como la temperatura de celda cuando el PFV opera bajo $G = 1000 \text{ W/m}^2$ y $T_a = 25^\circ\text{C}$ (Tegani et al., 2013). Todos estos valores pueden ser encontrados en la hoja de datos de fabricantes de PFV.

4.3.3. Modelamiento del Generador Diésel -GD-

Con un enfoque muy similar al modelamiento de la PC, la curva de eficiencia del GD puede ser usada para determinar el consumo aproximado de diésel de un determinado perfil de potencia P_{GD} , ya que la curva de eficiencia de un GD puede emplearse como una función de su potencia de salida P_{GD} (Gupta, Saini, & Sharma, 2011; Kusakana & Vermaak, 2014). A su vez, P_{GD} es la variable de control, la cual debe hallarse para implementarse en la ecuación de balance de potencias propuesto en (27). Con base en (33), esto es equivalente a decir

$$\Delta Diesel [k] \approx F(P_{GD}[k], ef_{GD}[k], k) * t_k \quad (57)$$

Donde $F(P_{GD}[k], ef_{GD}[k], k)$ es una función de interpolación realizada en el mapa de eficiencia del GD, con $ef_{GD}[k]$ como la eficiencia del GD en cualquier instante de tiempo k . La curva de eficiencia normalmente es suministrada por el fabricante de los GD.

4.3.4. Modelamiento de Baterías -BAT-

Empleando también un enfoque simplificado, la variable de estado SOC_{BAT} y su variación ΔSOC_{BAT} , al igual que con los SC, puede ser estimada a partir de la capacidad nominal del banco de BAT, $C_{BAT_{bank}}$, y las eficiencias de carga ef_c o descarga ef_d , para un determinado perfil de potencia de salida P_{BAT} . Esto es,

$$C_{BAT_{bank}} = C_{BAT} * \# BAT \quad (58)$$

$$(cargando) \quad \Delta SOC_{BAT}[k] = \frac{P_{BAT}[k] * ef_c}{C_{BAT_{bank}}} \quad (59)$$

$$(descargando) \quad \Delta SOC_{BAT}[k] = -\frac{P_{BAT}[k] * ef_d}{C_{BAT_{bank}}} \quad (60)$$

Este modelo puede ser revisado en (Fathima & Palanisamy, 2015; Tegani et al., 2013; Zhao et al., 2014)

4.4 Caso de estudio

Como caso de estudio se adaptará un problema de D&P a una nanored eléctrica aislada, ubicada geográficamente en Colombia y contemplado para ser una posible solución aplicada y real en la energización en una ZNI del territorio. Se desarrolla una estrategia de operación enfocada en

encontrar la distribución de potencia óptima entre las fuentes con el objetivo de minimizar el consumo de combustible del GD.

4.4.1. Topología

La topología para este caso de estudio de nanored aislada será el mostrado en la figura 13. En este caso de estudio se analizará la distribución óptima de potencias con el objetivo de minimizar el consumo de diésel. Posteriormente, se analizaron cuatro configuraciones diferentes a las que se les realizó un estudio técnico-económico-ambiental con base en sus respectivas distribuciones de potencias óptimas.



Figura 13. Topología para integración de etapas en una nanored con fuentes PFV-GD-BAT

Las cuatro configuraciones a estudiar fueron con las siguientes unidades de PFV-BAT-GD:

- C1 - Sin penetración de renovables: $PFV = 0$, $BAT = 0$, $GD = 1$
- C2 - Con mediana penetración de renovables: $PFV = 500$, $BAT = 20$, $GD = 1$

- C3 - Con alta penetración de renovables: $PFV = 2500$, $BAT = 50$, $GD = 1$
- C4 - Solo renovables: $PFV = 5800$, $BAT = 200$, $GD = 0$

Por último, se analizó la influencia de la gestión de energía óptima con el fin de minimizar el consumo de diésel y evaluar su influencia en los costos finales del dimensionado.

4.4.2. Implementación

Para implementar la solución propuesta, es necesario identificar los insumos que se tienen y con base en ellos hallar los perfiles de generación, almacenamiento y/o de demanda necesarios. Aplicando la distribución de potencias mostrada en la ecuación (27), se implementa DP para hallar los valores óptimos de las variables de estado SOC_{BAT} y control P_{GD} . Con estos valores se hallan los perfiles de potencia de las fuentes que logren cumplir esa distribución de potencias óptima. Como se mencionó con anterioridad, los insumos de este caso de estudio serán: el comportamiento de la demanda P_{CARGA} , la Irradiancia $G [W/m^2]$ y la Temperatura ambiente $T_a[^\circ C]$.

Para definir los insumos, el primer paso fue ubicar geográficamente el lugar donde se dispondría la nanored. El lugar escogido fue el Parque Nacional del Chicamocha -PANACHI-, con una ubicación $[Lat. 6.79^\circ N, long. -73.00^\circ W, alt. 1304 m]$. Con esta información geográfica y con la herramienta *PVsystem*, se generan de manera sintética datos de todo un año calendario con intervalos de una hora de las variables $G [W/m^2]$ y $T_a[^\circ C]$. Para efectos de esta investigación, se tomaron los datos del día 20 de junio en el calendario. Con estos insumos, junto con los parámetros del PFV entregados por fabricante en su hoja de datos, se puede hallar el perfil de generación de los arreglos de PFV P_{FV} resolviendo el modelamiento de PFV propuesto en las ecuaciones (51) a (58).

El PFV seleccionado para este estudio es el *Sunmodule SW 500 poly / Version 2.0 and 2.5 Frame*, su hoja de datos se puede consultar en (SolarWorld, 2012). La figura 14 (a) muestra la curva de irradiancia generada por PVsyst; (b) muestra el perfil de P_{FV} generado por un PFV del modelo seleccionado con dicha G y T_a , esto tanto del lugar determinado así como el día seleccionado.

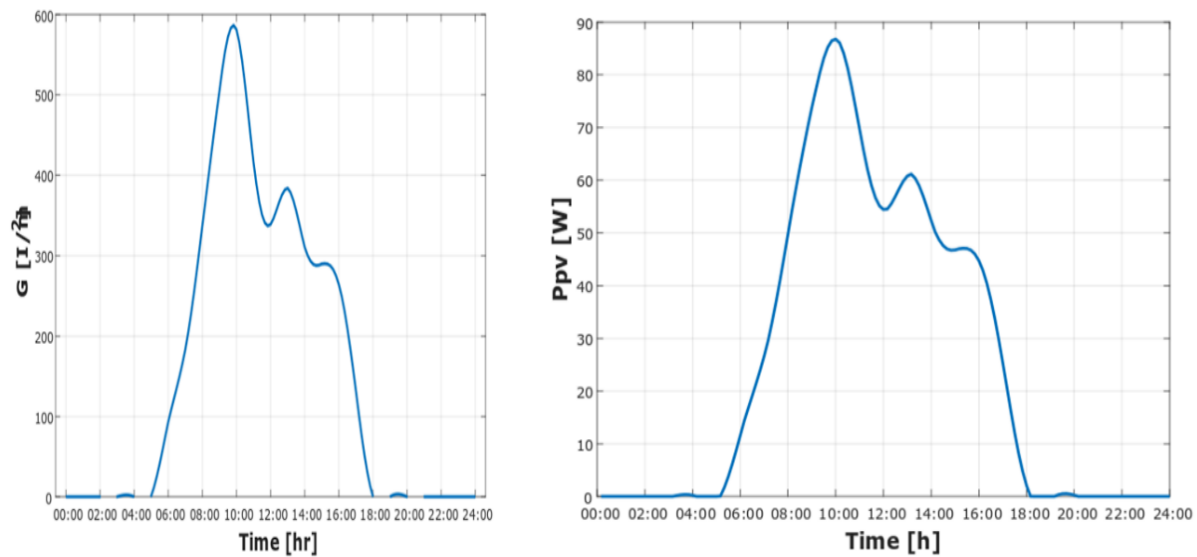


Figura 14. (a) Curva de Irradiancia [W/m^2] generada con PVsyst para el día 20 de junio
(b) Curva de P_{FV} [W] generada por un PFV con la irradiancia generada.

Dado que la ubicación geográfica es en el departamento de Santander, el perfil de demanda será tomado de la recomendación de la Electrificadora de Santander ESSA S.A., que propone, para sus normas de cálculo y diseño de sistemas de distribución, una curva de demanda diaria para estratos uno y dos a nivel urbano o nivel rural, lo cual se adapta a nuestro caso de estudio. Esta información puede ser consultada en (ESSA Electrificadora de Santander S.A. E.S.P., 2012). La figura 15 muestra el perfil de demanda diaria que se va a implementar.

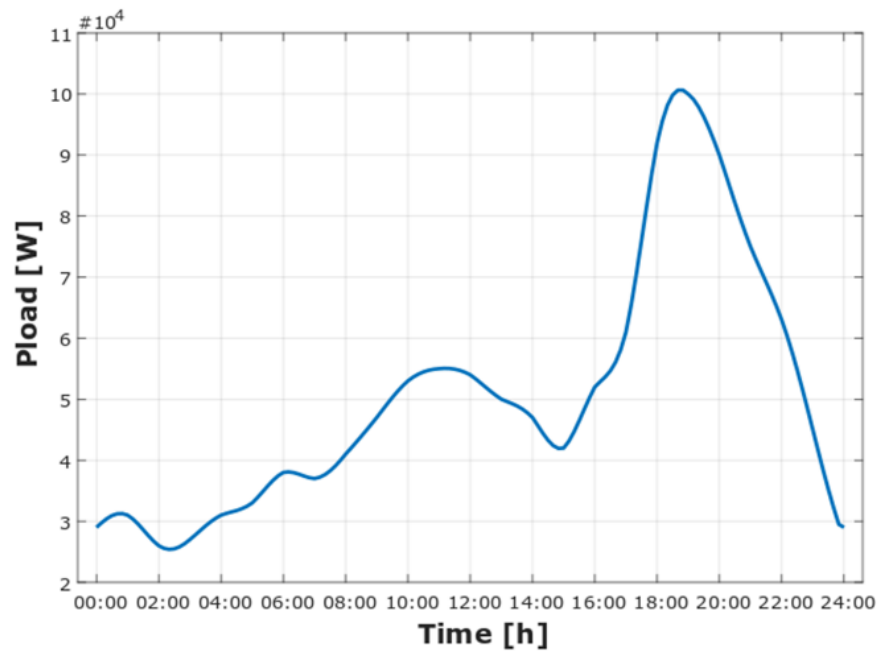


Figura 15. Curva de demanda para la zona rural de estudio

Para el modelamiento del GD, se implementa un *Cummins C11 D5 (X-series)* de $P_{GD} = 10kW$. El mapa de eficiencia de este generador es puede ser consultado en su hoja de datos (Cummins Power Generation, 2012).

Para este caso de estudio, el SAE fue un banco de BAT. Cada una de las BAT corresponde al fabricante *Trojan Battery Company* con su modelo *SAGM 12 205*, una BAT de ciclo profundo y polipropileno especial para aplicaciones con generación PFV. Esta BAT tiene un $V_{BAT} = 12 V$ y una $C_{BAT} = 205 Ah$. Su hoja de datos cuenta con un mapa de SOC_{BAT} vs. V_{BATOC} , con el cual se modelará su comportamiento resolviendo las ecuaciones (59) a (61). Para consultar su hoja de datos, puede remitirse a (Trojan Battery Company, 2016).

Con esta información se lanza el DP para hallar las distribuciones óptimas de potencias, en la capa interna del algoritmo propuesto. En la capa externa se hará un análisis de dimensionamiento

con las cuatro configuraciones propuestas. Se realizará una evaluación de cada solución tomando en consideración los requerimientos técnicos dado por la distribución óptima de potencias, pero además se realizará una evaluación económica y de impacto ambiental como el propuesto en las ecuaciones (39) a (50).

4.4.3. Resultados

Al hallar las distribuciones de potencias óptimas de cada combinación posible, el consumo de *diesel* puede ser determinado. La figura 16 es un mapa de calor que muestra la relación entre el consumo de *diesel* total consumido por el GD por día en función de la variación del número de BAT en su SAE y la variación del número de PFV instalados.

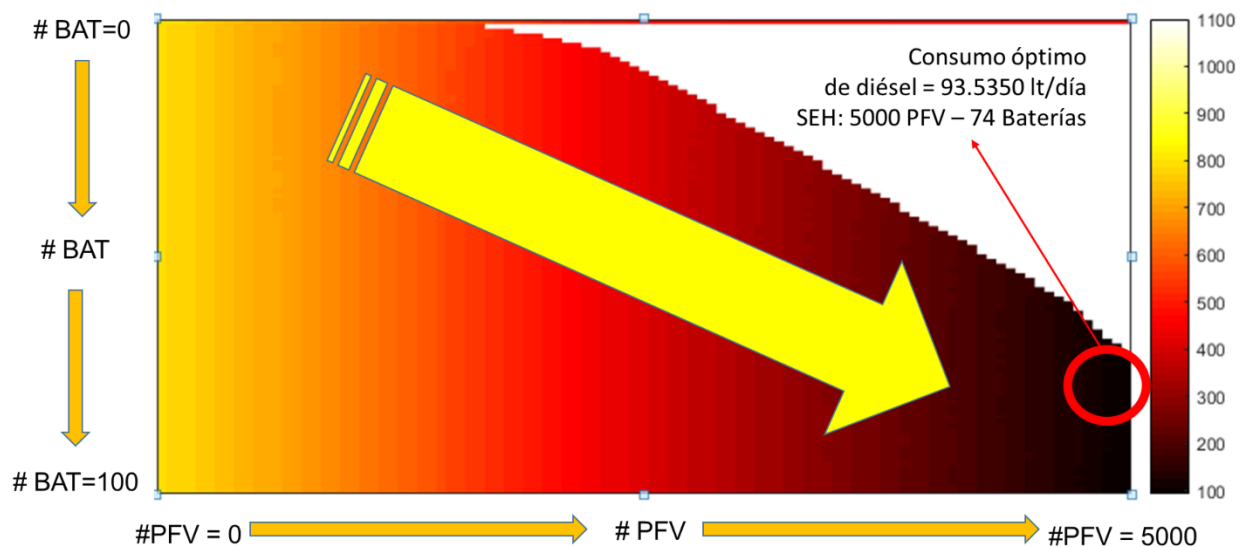


Figura 16. Curva de demanda para la zona rural de estudio

El consumo de diésel por el GD tiende a disminuir a mayor número BAT y a mayor número de PFV., lo cual era de esperarse. Para este caso de estudio, el consumo mínimo de *Diesel* necesario para suplir el perfil de carga por ciclo diario teniendo como $\#_{max}BAT = 100$ y $\#_{max}PFV =$

5000 es de 93.53 lt/día con la configuración $\#BAT = 74$ y $\#PFV = 5000$. El resultado no se da con los máximos valores posibles de BAT y PFV en su configuración, lo que indica que con esta metodología sea hallado el dimensionamiento óptimo para el objetivo propuesto.

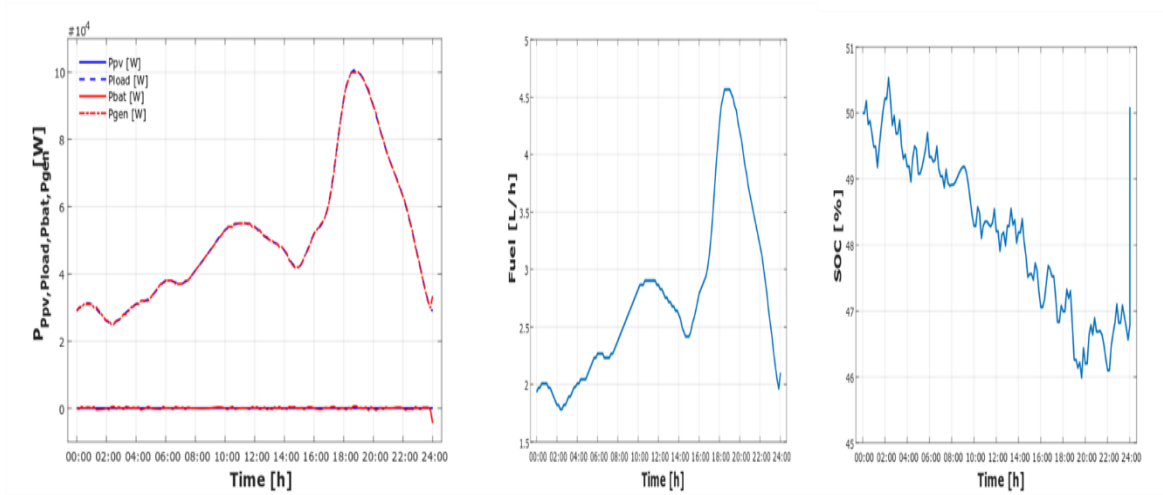
Los resultados completos para las 4 configuraciones planteadas en el caso de estudio son mostrados en la tabla 8.

Tabla 8.

Resultados análisis técnico-económico-ambiental de nanored aislada con PFV-BAT-GD

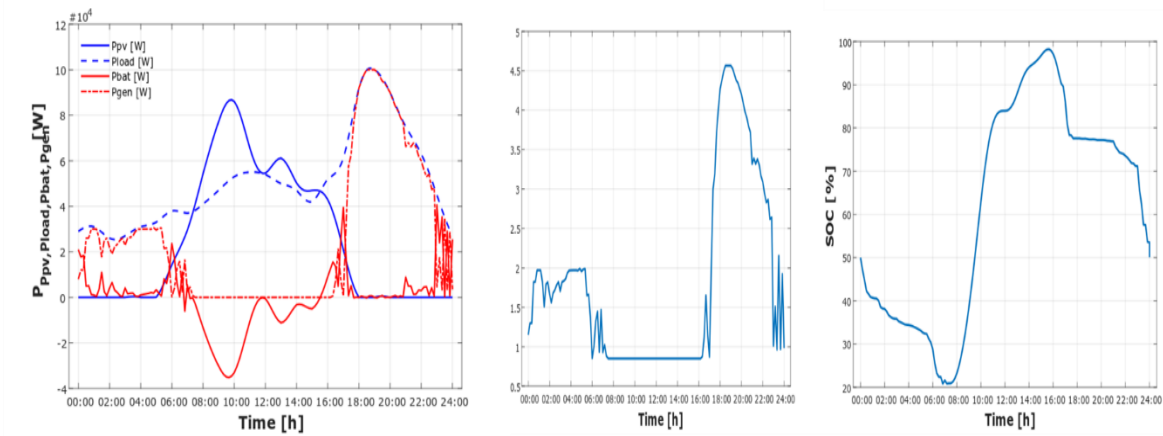
Costos / Configuración		C1	C2	C3	C4
Dimen- sionado	PFV	0	500	2500	5800
	BAT	0	20	50	200
	GD	1	1	1	0
Económico	C_I (\$) ¹	420	865	2470	5050
	C_{oper} (\$) ¹	7868	7087	4104	0
	C_{man} (\$) ¹	1508	1359	787	171
	C_r (\$) ¹	420	560	770	1400
	C_{pol} (\$) ¹	2350	2124	1231	0
	C_T (\$) ¹	12566	11995	9362	6461
	C_{EA} (\$/año) ¹	503	480	375	151
Ambiental	C_F (lt)	1276000	876000	560730	0
	E_{pol} (t)	153175	137975	79900	0
	E_{CO_2} (t)	140843	117346	63150	0
	$E_{CO_{2eq}}$ (t)	143941	121069	66347	0
	R_{ER} (%)	0	21	52	100

¹ Nota: Todos los valores son dados en millones [COP]



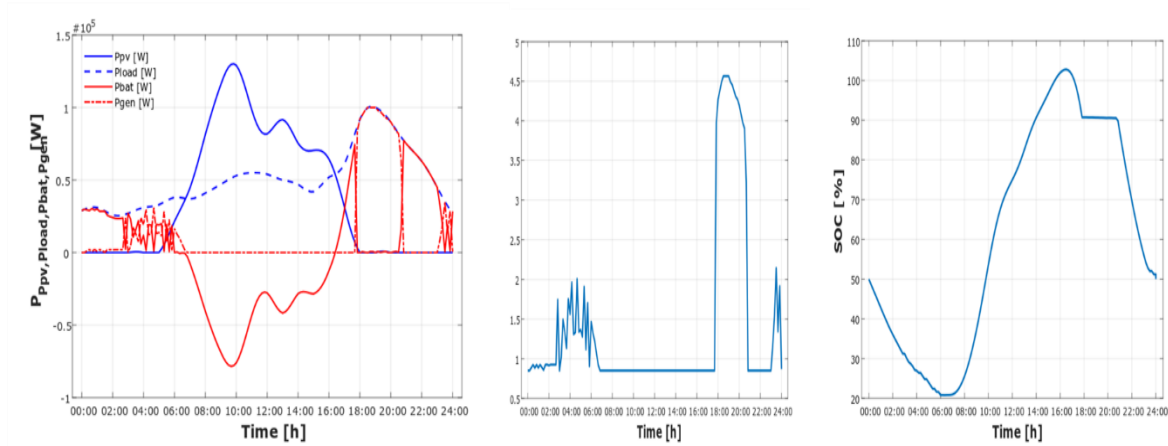
$$\begin{aligned}
 N_{bat} &= 1 & N_{gen} &= 1 & N_{pv} &= 0 & C_{pv} &= \$0 & C_{gen} &= \$341,77e6 \\
 C_{bat} &= \$2,6242e6 & C_{fuel} &= \$3089,2e6 & C_c &= \$3433,6e6
 \end{aligned}$$

Figura 17. Caso 1: Sin penetración de energías renovables: (a) Distribución de flujos de potencias; (b) Consumo de diésel por el GD; (c) SOC del banco de BAT



$$\begin{aligned}
 N_{bat} &= 6 & N_{gen} &= 1 & N_{pv} &= 1000 & C_{pv} &= \$1057e6 & C_{gen} &= \$341,77e6 \\
 C_{bat} &= \$15,745e6 & C_{fuel} &= \$2052,6e6 & C_c &= \$3467,2e6
 \end{aligned}$$

Figura 18. Caso 2: Con penetración media de energías renovables: (a) Distribución de flujos de potencias; (b) Consumo de diésel por el GD; (c) SOC del banco de BAT



$$N_{bat} = 20 \quad N_{gen} = 1 \quad N_{pv} = 1500 \quad C_{pv} = \$1585,7e6 \quad C_{gen} = \$341,77e6$$

$$C_{bat} = \$52,484e6 \quad C_{fuel} = \$1571,6e6 \quad C_c = \$3551,6e6$$

Figura 19 Caso 3: Con penetración alta de energías renovables: (a) Distribución de flujos de potencias; (b) Consumo de diésel por el GD; (c) SOC del banco de BAT

4.4.4. Análisis de resultados

El análisis se realiza extrapolando la vida útil del proyecto a 15 años. Por lo que se calculan los costos de inversión y por consumo de diésel durante ese periodo.

En el primer caso, la topología fue con un GD - un banco de una BAT y sin PFV. Se puede apreciar claramente que quien se encarga de cubrir la demanda es el GD. Esto se da, debido a que no sería eficiente cargar el banco de BAT para luego descargarlo nuevamente, lo cual generaría unas pérdidas evitables si alimentamos directamente la carga con el GD. Dado esto, el costo del consumo de combustible en esta topología es el mayor, con un valor de \$3089 millones COP, sin embargo, no tiene ningún costo la adquisición de PFV. Para esta topología el costo total de inversión y de combustible en los 15 años alcanza un valor de \$3433 millones COP.

En el segundo caso, la topología fue con un GD - un banco de seis BAT y con un parque de 1000 PFV. Con la entrada del parque PFV, vemos que la inversión en la adquisición de los equipos fue de \$1057 millones COP. Pero al tener esta generación renovable, el uso del GD se ve disminuido, por lo que el consumo de diésel es mucho menor. En la ventana de tiempo de la vida útil del proyecto, se logró un ahorro de \$1037 millones COP. Vemos que el aumento del costo en la inversión para tener generación renovable es amortiguado por el ahorro que se genera al no consumir diésel. Ya con esta configuración, vemos que, en la parte de mayor irradiancia solar el cual es alrededor del mediodía, ya hay unos excedentes de generación PFV, los cuales son enviados al banco de BAT para ser almacenados y poder ser utilizados cuando haya un déficit de generación PFV y/o haya una demanda más alta por parte de los usuarios. Para esta topología, el costo total de inversión y de combustible en los 15 años alcanza un valor de \$3467 millones COP.

Ya para el tercer caso, la topología fue con un GD - un banco de veinte BAT y con un parque de 1500 PFV. Nuevamente y como era de esperarse al tener mayor penetración de energías renovables, menor será el consumo de diésel. En este caso, la inversión en la adquisición de los equipos tuvo un aumento de fue de \$528 millones COP con respecto al 2do caso. Justamente, el ahorro en combustible fue de \$481 millones COP, valores relativamente cercanos. Al tener un banco de BAT con más capacidad energética, mayor va a ser el respaldo que proveerá cuando haya déficit de generación renovable. Se puede apreciar entonces, como la demanda de energía nocturna es asumida en gran parte por el banco de BAT, ayudando también a la disminución de consumo de combustible. Al final de esta configuración, el costo total de inversión más el consumo de combustible sumó \$3551 millones COP.

Con este caso de estudio particular, vemos que no necesariamente a mayor penetración de renovables va a ser más económico. Los resultados arrojan que en inversión y en consumo de combustible, los valores son amortiguados entre ellos. Sin embargo, al tener menos consumo de diésel, estaremos teniendo un impacto ambiental más amigable y sostenible.

5. Conclusiones

Cuando se desarrollan controladores subóptimos causales, es una ventaja si se conoce el controlador óptimo, incluso si este controlador no es causal. En muchos casos, dichos controladores óptimos se pueden encontrar utilizando el algoritmo de DP. Por este motivo, y aunque la técnica DP no funciona para resolver problemas en tiempo real, si puede ser una herramienta para hibridar el proceso de optimización, logrando una guía basada en la optimalidad para basar nuevos comportamientos del sistema, como lo pueden ser, la creación de mejores reglas y por ende una optimización al proceso.

Este trabajo presentó una metodología para dimensionar una PC y un SC en VEH configurado con FC-UC. La metodología considera dos estrategias de gestión energética diferentes (EMS) para definir la distribución de potencias entre las fuentes. La metodología se realiza para comparar los tamaños obtenidos con un EMS óptimo basado en DP y con un EMS basado en reglas implementando FL. Los resultados muestran como DP mejora los ahorros de combustible, en este caso H_2 entre un 25 y 28%, lo que invita a una mejora en las reglas planteadas en FL, la cual puede llegar viendo el comportamiento óptimo que tiene el sistema cuando se implementa DP.

Para los casos considerados, los resultados que utilizan el controlador basado en reglas y el óptimo son diferentes. La razón principal para explicar esta discrepancia es el aumento en el

consumo debido a la falta de optimalidad del EMS basado en FL. Los resultados obtenidos utilizando los dos EMS se comparan con la energía suministrada por el PC. Sin embargo, en futuras investigaciones, una función de costo completa debe considerar el costo de la SC y el PC, así como el costo relacionado con la degradación de la PC debido a las referencias de potencia de alta frecuencia.

Referencias

- Araújo, R. E., De Castro, R., Pinto, C., Melo, P., & Freitas, D. (2014). Combined sizing and energy management in EVs with batteries and supercapacitors. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 63(7), 3062–3076. <https://doi.org/10.1109/TVT.2014.2318275>
- Audio Pinto, C., Barreras, J. V., De Castro, R., Araújo, R. E., & Schaltz, E. (2017). Study on the combined influence of battery models and sizing strategy for hybrid and battery-based electric vehicles. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.009>
- Augustine, N., Suresh, S., Moghe, P., & Sheikh, K. (2012). Economic dispatch for a microgrid considering renewable energy cost functions. *2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/ISGT.2012.6175747>
- Bahramirad, S., Reder, W., & Khodaei, A. (2012). Reliability-constrained optimal sizing of energy storage system in a microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid*. <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2217991>
- Baños, R., Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F. G., Gil, C., Alcayde, A., & Gómez, J. (2011). Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 1753–1766. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.12.008>
- Bellman, R. E. (1956). Dynamic Programming and Lagrange Multipliers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Proceedings of the National Academy of Sciences.
- Bertsekas, D. (2005). *Dynamic Programming and Optimal Control. Analysis* (3rd ed., Vol. I). Belmont, Massachusetts: Athena Scientific. <https://doi.org/10.1057/jors.1996.103>
- Borghetti, A., Bosetti, M., Bossi, C., Massucco, S., Micolano, E., Morini, A., ... Silvestro, F. (2007). An energy resource scheduler implemented in the automatic management system of a microgrid test facility. In *2007 International Conference on Clean Electrical Power, ICCEP '07*. <https://doi.org/10.1109/ICCEP.2007.384193>
- Celli, G., Pilo, F., Pisano, G., & Soma, G. G. (2005). Optimal participation of a microgrid to the energy market with an intelligent EMS. *2005 International Power Engineering Conference*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/IPEC.2005.206991>
- Chakraborty, S., & Simoes, M. G. (2005). Fuzzy ARTMAP based forecast of renewable generation for a high frequency AC microgrid. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2005, 762–767. <https://doi.org/10.1109/IECON.2005.1569000>
- Chakraborty, S., & Simoes, M. G. (2008). PV-microgrid operational cost minimization by neural forecasting and heuristic optimization. In *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*. <https://doi.org/10.1109/08IAS.2008.147>

- Chakraborty, S., Weiss, M. D., & Simões, M. G. (2007). Distributed intelligent energy management system for a single-phase high-frequency AC microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. <https://doi.org/10.1109/TIE.2006.888766>
- Chauhan, A., & Saini, R. P. (2013). Renewable energy based power generation for stand-alone applications: A review. *Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS), 2013 International Conference On*, 424–428. <https://doi.org/10.1109/ICEETS.2013.6533420>
- Chauhan, A., & Saini, R. P. (2014). A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 99–120. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.079>
- Chen, B. C., Wu, Y. Y., & Tsai, H. C. (2014). Design and analysis of power management strategy for range extended electric vehicle using dynamic programming. *Applied Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.018>
- Chen, C., Duan, S., Cai, T., Liu, B., & Yin, J. (2009). Energy trading model for optimal microgrid scheduling based on genetic algorithm. *2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC '09*, 3, 2136–2139. <https://doi.org/10.1109/IPEMC.2009.5157753>
- Chen, S. X., Gooi, H. B., & Wang, M. Q. (2012). Sizing of energy storage for microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(1), 142–151. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2160745>
- Chen, Y.-H., Lu, S.-Y., Chang, Y.-R., Lee, T.-T., & Hu, M.-C. (2012). Economic analysis and optimal energy management models for microgrid systems: A case study in Taiwan. *Applied Energy*, 103, 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.09.023>
- Chen, Z., Mi, C. C., Xu, J., Gong, X., & You, C. (2014). Energy management for a power-split plug-in hybrid electric vehicle based on dynamic programming and neural networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 63(4), 1567–1580. <https://doi.org/10.1109/TVT.2013.2287102>
- Cummins Power Generation. (2012). Generator set data sheet Model C11 D5 (X-series). *Diesel Generator Datasheet*. Cummins Power Generation.
- Depature, C., Jemei, S., Boulon, L., Bouscayrol, A., Marx, N., Morando, S., & Castaings, A. (2016). IEEE VTS Motor Vehicles Challenge 2017 - Energy Management of a Fuel Cell/Battery Vehicle. In *2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)* (pp. 1–6). Hangzhou, China: IEEE. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2016.7791701>
- Départure, C., Lhomme, W., Bouscayrol, A., Sicard, P., & Boulon, L. (2015). Efficiency map of the traction system of an electric vehicle from an on-road test drive. *2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2014*. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2014.7007056>
- Depature, C., Lhomme, W., Sicard, P., Bouscayrol, A., & Boulon, L. (2018). Real-Time Backstepping

- Control for Fuel Cell Vehicle Using Supercapacitors. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(1), 306–314. <https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2728823>
- Di Silvestre, M. L., Graditi, G., & Riva Sanseverino, E. (2014). A generalized framework for optimal sizing of distributed energy resources in micro-grids using an indicator-based swarm approach. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(1), 152–162. <https://doi.org/10.1109/TII.2013.2272945>
- Domínguez, R., Solano, J., & Jacome, A. (2018). Sizing of Fuel Cell - Ultracapacitors Hybrid Electric Vehicles Based on the Energy Management Strategy. In *2018 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)* (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2018.8605018>
- ESSA Electrificadora de Santander S.A. E.S.P. (2012). NORMAS PARA CÁLCULO Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN. Bucaramanga: ESSA Electrificadora de Santander S.A. E.S.P.
- Faisal A., M. ;, & Heikki N., K. (2011). Multiobjective optimization using modified game theory for online management of microgrid. *EUROPEAN TRANSACTIONS ON ELECTRICAL POWER*, 21(E1), 839–854. <https://doi.org/10.1002/etep>
- Fan, Y., Rimali, V., Tang, M., & Nayar, C. (2012). Design and implementation of stand-alone smart grid employing renewable energy resources on Pulau Ubin Island of Singapore. In *cccc2012 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility, APEMC 2012 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/APEMC.2012.6237907>
- Farahmand, F., Khandelwal, T., Dai, J. J., & Shokooh, F. (2011). An enterprise approach to the interactive objectives and constraints of Smart Grids. *2011 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies - Middle East, ISGT Middle East 2011*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ISGT-MidEast.2011.6220790>
- Fathima, A. H., & Palanisamy, K. (2015). Optimization in microgrids with hybrid energy systems - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.059>
- Feroldi, D., Serra, M., & Riera, J. (2009). Energy Management Strategies based on efficiency map for Fuel Cell Hybrid Vehicles. *Journal of Power Sources*, 190(2), 387–401. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.01.040>
- Gamarra, C., & Guerrero, J. M. (2015). Computational optimization techniques applied to microgrids planning: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.025>
- Gu, W., Wu, Z., Bo, R., Liu, W., Zhou, G., Chen, W., & Wu, Z. (2014). Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: A review. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 54(May), 26–37. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.06.028>
- Gupta, A., Saini, R. P., & Sharma, M. P. (2011). Modelling of hybrid energy system-Part I: Problem

- formulation and model development. *Renewable Energy*, 36(2), 459–465. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.035>
- Guzzella, L., & Onder, C. H. (2010). *Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems* (2da Ed.). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-10775-7>
- Guzzella, L., & Sciarretta, A. (2013). *Vehicle Propulsion Systems* (2nd ed.). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-35913-2>
- Han, Y., Young, P., & Zimmerle, D. (2013). Optimal selection of generators in a microgrid for fuel usage minimization. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. <https://doi.org/10.1109/PESMG.2013.6672746>
- Hernandez-Aramburo, C. a., & Green, T. C. (2004). Fuel consumption minimisation of a microgrid. *Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting.*, 3(3), 673–681. <https://doi.org/10.1109/IAS.2004.1348751>
- Hinaje, M., Noiying, P., Thounthong, P., Raël, S., & Davat, B. (2011). A proton exchange membrane fuel cell running as a regulated current source. *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2011*. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2011.6042987>
- Honda Motors. (2002). Honda Fuel Cell Power – FCX 2002. Retrieved from <https://global.honda/heritage/timeline/product-history/automobiles/2002FCX.html>
- Honda Motors. (2016). Honda Clarity Fuel Cell. Retrieved from <https://global.honda/innovation/FuelCell/Clarity-Fuel-Cell-picturebook.html>
- Hu, X., Murgovski, N., Johannesson, L. M., & Egardt, B. (2014). Comparison of three electrochemical energy buffers applied to a hybrid bus powertrain with simultaneous optimal sizing and energy management. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(3), 1193–1205. <https://doi.org/10.1109/TITS.2013.2294675>
- Huang, C. C., Chen, M. J., Liao, Y. T., & Lu, C. N. (2012). DC microgrid operation planning. *2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2012*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2012.6477447>
- Hyundai Motors. (2014). Hyundai Tucson Fuel-Cell. Retrieved from <https://www.caranddriver.com/hyundai/tucson-fuel-cell>
- IEEE Standard. Recommended Practice for the Planning and Design of the Microgrid (2019). IEEE.
- Kanchev, H., Lazarov, V., & Francois, B. (2012). Environmental and economical optimization of microgrid long term operational planning including PV-based active generators. *15th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, EPE-PEMC 2012 ECCE Europe*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2012.6397454>

- Kanchev, Hristiyan, Lu, D., Colas, F., Lazarov, V., Francois, B., & Member, S. (2011). Kanchev-2011-Energy Management and Operational, 58(10), 4583–4592.
- Khaligh, A., & Li, Z. (2010). Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: State of the art. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59(6), 2806–2814. <https://doi.org/10.1109/TVT.2010.2047877>
- Khatib, T., Mohamed, A., & Sopian, K. (2013). A review of photovoltaic systems size optimization techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 454–465. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.023>
- Kim, M. J., & Peng, H. (2007). Power management and design optimization of fuel cell/battery hybrid vehicles. *Journal of Power Sources*, 165(2), 819–832. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.12.038>
- Kumaravel, S., Ashok, S., & Balamurugan, P. (2012). Techno-economic feasibility study of biomass based hybrid renewable energy system for microgrid application. In *2012 International Conference on Green Technologies, ICGT 2012*. <https://doi.org/10.1109/ICGT.2012.6477956>
- Kusakana, K., & Vermaak, H. J. (2014). Hybrid diesel generator/renewable energy system performance modeling. *Renewable Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.11.025>
- Kyriakarakos, G., Dounis, A. I., Arvanitis, K. G., & Papadakis, G. (2012). A fuzzy logic energy management system for polygeneration microgrids. *Renewable Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.11.019>
- Larsson, V., Johannesson, L., & Egardt, B. (2015). Analytic solutions to the dynamic programming subproblem in hybrid vehicle energy management. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(4), 1458–1467. <https://doi.org/10.1109/TVT.2014.2329864>
- Lidula, N. W. A., & Rajapakse, A. D. (2011). Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 186–202. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.041>
- Litchy, A. J., Young, C., Pourmousavi, S. A., & Nehrir, M. H. (2012). Technology selection and unit sizing for a combined heat and power microgrid: Comparison of WebOpt and HOMER application programs. In *2012 North American Power Symposium, NAPS 2012*. <https://doi.org/10.1109/NAPS.2012.6336337>
- Liu, J., Chen, Y., Li, W., Shang, F., & Zhan, J. (2018). Hybrid-Trip-model-based energy management of a PHEV with computation-optimized dynamic programming. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(1), 338–353. <https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2777852>
- Logenthiran, T., Srinivasan, D., Khambadkone, A. M., & Raj, T. S. (2010). Optimal sizing of an islanded microgrid using Evolutionary Strategy. In *2010 IEEE 11th International Conference on Probabilistic*

- Methods Applied to Power Systems, PMAPS 2010*. <https://doi.org/10.1109/PMAPS.2010.5528840>
- Lu, L., Tu, J., Chau, C.-K., Chen, M., & Lin, X. (2013). Online energy generation scheduling for microgrids with intermittent energy sources and co-generation. *Proceedings of the ACM ...*, 41, 53–66. <https://doi.org/10.1145/2465529.2465551>
- Luu, N. A. (2015). Control and management strategies for a microgrid.
- Mahmoud, T. S., Habibi, D., & Bass, O. (2012). Fuzzy logic for smart utilisation of Storage Devices in a typical microgrid. *2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2012*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2012.6477333>
- Majic, L., Krzelj, I., & Delimar, M. (2013). Optimal scheduling of a CHP system with energy storage. *36th International Convention on Information & Communication Technology Electronics & Microelectronics (MIPRO)*, 1253–1257. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6596449
- Mariam, L., Basu, M., & Conlon, M. F. (2013). A Review of Existing Microgrid Architectures. *Journal of Engineering (United States)*, 2013, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2013/937614>
- Marnay, C., Venkataramanan, G., Stadler, M., Siddiqui, A., Firestone, R., & Chandran, B. (2007). Optimal Technology Selection and Operation of Commercial- Building Microgrids - LBNL No. 62315. *IEEE Trans. Power Syst.*, 23(3), 1–10.
- Martín, T., & Isabel, T. (2013). *Operación Y Gestión De Microrredes Energéticas Urbanas En Un Entorno De Sostenibilidad Energética Y Ambiental*. Universidad de Barcelona. Universidad de Barcelona. Retrieved from http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/19411/1/TamaraTolon_MemoriaTFM_Deposito.pdf
- Masih-Tehrani, M., Ha'iri-Yazdi, M. R., Esfahanian, V., & Safaei, A. (2013). Optimum sizing and optimum energy management of a hybrid energy storage system for lithium battery life improvement. *Journal of Power Sources*. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.04.154>
- Maxwell Technologies. (2016). K2 ultracapacitors - 3.0V/3000F. München, Alemania: Maxwell Technologies.
- Menniti, D., Pinnarelli, a., & Sorrentino, N. (2009). A method to improve microgrid reliability by optimal sizing PV/wind plants and storage systems. *IET Conference Publications*, (April 2016), 816–816. <https://doi.org/10.1049/cp.2009.1003>
- Mohamed, F. A., & Koivo, H. N. (2010). System modelling and online optimal management of MicroGrid using Mesh Adaptive Direct Search. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 32(5), 398–407. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2009.11.003>
- Mohamed, F. A., & Koivo, H. N. (2012). Multiobjective optimization using Mesh Adaptive Direct Search

- for power dispatch problem of microgrid. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2011.09.006>
- Mohammadi, S., Mozafari, B., Solimani, S., & Niknam, T. (2013). An Adaptive Modified Firefly Optimisation Algorithm based on Hong's Point Estimate Method to optimal operation management in a microgrid with consideration of uncertainties. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.12.013>
- Muñoz, Y. A. (2012). Optimizacion De Recursos Energeticos En Zonas Aisladas Mediante Estrategias De Suministro Y Consumo. *Ing.Puc.Cl.* Retrieved from http://www2.ing.puc.cl/iee2682/biblio/IEE2682_PROGRAMA_0601.pdf
- Navaeefard, A., Tafreshi, S. M. M., Barzegari, M., & Shahrood, A. J. (2010). Optimal sizing of distributed energy resources in microgrid considering wind energy uncertainty with respect to reliability. *2010 IEEE International Energy Conference and Exhibition, EnergyCon 2010*, 820–825. <https://doi.org/10.1109/ENERGYCON.2010.5771795>
- Nayar, C., Tang, M., & Suponthana, W. (2008). Wind/PV/diesel micro grid system implemented in remote islands in the republic of maldives. In *2008 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, ICSET 2008*. <https://doi.org/10.1109/ICSET.2008.4747166>
- Nguyen, M. Y., Yoon, Y. T., & Choi, N. H. (2009). Dynamic Programming Formulation of Micro- Grid Operation with Heat and Electricity Constraints. *Constraints*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/TD-ASIA.2009.5356870>
- Niknam, T., Golestaneh, F., & Malekpour, A. R. (2013). Probabilistic model of polymer exchange fuel cell power plants for hydrogen, thermal and electrical energy management. *Journal of Power Sources*. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.11.052>
- Nwulu, N. I., & Xia, X. (2017). Optimal dispatch for a microgrid incorporating renewables and demand response. *Renewable Energy*, 101, 16–28. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.026>
- Obara, S. ya, & El-Sayed, A. G. (2009). Compound microgrid installation operation planning of a PEFC and photovoltaics with prediction of electricity production using GA and numerical weather information. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(19), 8213–8222. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.08.006>
- Paliwal, P., Patidar, N. P., & Nema, R. K. (2014). Determination of reliability constrained optimal resource mix for an autonomous hybrid power system using Particle Swarm Optimization. *Renewable Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.09.003>
- Quiggin, D., Cornell, S., Tierney, M., & Buswell, R. (2012). A simulation and optimisation study: Towards a decentralised microgrid, using real world fluctuation data. *Energy*, 41(1), 549–559. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.007>

- R. E. Bellman. (1955). *The Theory of Dynamic Programming* (1st ed.). Laramie: The Rand Corporation.
- R. Luus. (2000). *Iterative Dynamic Programming*. (A. Brezis, H.; Douglas, R.G.; Jeffrey, Ed.), CHAPMAN & HALLKRC (110th ed., Vol. 110). Boca Raton London New York Washington, D.C: CHAPMAN & HALLKRC. <https://doi.org/10.2307/3619755>
- Ravey, A., Blunier, B., & Miraoui, A. (2012). Control strategies for fuel-cell-based hybrid electric vehicles: From offline to online and experimental results. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(6), 2452–2457. <https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2198680>
- Ravey, A., Roche, R., Blunier, B., & Miraoui, A. (2012). Combined optimal sizing and energy management of hybrid electric vehicles. In *2012 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ITEC.2012.6243420>
- Ravey, A., Watrin, N., Blunier, B., Bouquain, D., & Miraoui, A. (2011). Energy-Source-Sizing Methodology for Hybrid Fuel Cell Vehicles Based on Statistical Description of Driving Cycles. *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY*, 60(9). <https://doi.org/10.1109/TVT.2011.2158567>
- Riffonneau, Y., Bacha, S., Barruel, F., & Ploix, S. (2011). Optimal Power Flow Management for Grid Connected PV Systems With Batteries. *IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY*, 2(3). <https://doi.org/10.1109/TSTE.2011.2114901>
- Sheng, S., Li, P., Tsu, C. T., & Lehman, B. (2015). Optimal power flow management in a photovoltaic nanogrid with batteries. *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2015*, 4222–4228. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2015.7310256>
- Sinoquet, D., Rousseau, G., & Milhau, Y. (2011). Design optimization and optimal control for hybrid vehicles. *Optimization and Engineering*, 12(1–2), 199–213. <https://doi.org/10.1007/s11081-009-9100-8>
- Sobu, A., & Wu, G. (2012). Dynamic optimal schedule management method for microgrid system considering forecast errors of renewable power generations. In *2012 IEEE International Conference on Power System Technology, POWERCON 2012*. <https://doi.org/10.1109/PowerCon.2012.6401287>
- Solano, J., Duarte, J., Vargas, E., Cabrera, J., Jácome, A., Botero, M., & Rey, J. (2016). Dynamic Model and Control of a Photovoltaic Generation System using Energetic Macroscopic Representation. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 17(5), 575–582. <https://doi.org/10.1515/ijeeps-2016-0078>
- Solano, J., Hissel, D., & Pera, M. C. (2018). Fail-Safe Power for Hybrid Electric Vehicles: Implementing a Self-Sustained Global Energy Management System. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 13(2), 34–39. <https://doi.org/10.1109/MVT.2017.2776670>
- Solano, J., Hissel, D., & Péra, M. C. (2014). Energy management of an hybrid electric vehicle in degraded

- operation. 2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2014. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2014.7007063>
- SolarWorld. (2012). Sunmodule SW 225 poly / Version 2.0 and 2.5 Frame. *Www.Solarworld.Com*. USA.
- Sorrentino, M., Pianese, C., & Maiorino, M. (2013). An integrated mathematical tool aimed at developing highly performing and cost-effective fuel cell hybrid vehicles. *Journal of Power Sources*. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.08.001>
- Stluka, P., Godbole, D., & Samad, T. (2011). Energy management for buildings and microgrids. In *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*. <https://doi.org/10.1109/CDC.2011.6161051>
- Su, W., Yuan, Z., & Chow, M. Y. (2010). Microgrid planning and operation: Solar energy and wind energy. *IEEE PES General Meeting, PES 2010*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/PES.2010.5589391>
- Sundström, O., Ambühl, D., & Guzzella, L. (2009). On Implementation of Dynamic Programming for Optimal Control Problems with Final State Constraints. *Oil & Gas Science and Technology – Revue de l'Institut Français Du Pétrole*, 65(1), 91–102. <https://doi.org/10.2516/ogst/2009020>
- Sundström, Olle, & Guzzella, L. (2009). A generic dynamic programming Matlab function. *Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications*, (7), 1625–1630. <https://doi.org/10.1109/CCA.2009.5281131>
- Tafreshi, S. M. M. (n.d.). Optimal Unit Sizing Of Distributed Energy Resources In Micro Grid Using Genetic Algorithm. *Micro*.
- Tan, S., Xu, J. X., & Panda, S. K. (2013). Optimization of distribution network incorporating distributed generators: An integrated approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(3), 2421–2432. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2253564>
- Tani, A., Camara, M. B., & Dakyo, B. (2012). Energy management based on frequency approach for hybrid electric vehicle applications: Fuel-cell/lithium-battery and ultracapacitors. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(8), 3375–3386. <https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2206415>
- Tegani, I., Aboubou, A., Becherif, M., Ayad, M. Y., Kraa, O., Bahri, M., & Akhrif, O. (2013). Optimal sizing study of hybrid wind/PV/diesel power generation unit using genetic algorithm. *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 85(1), 134–140. <https://doi.org/10.1109/PowerEng.2013.6635594>
- Thounthong, P., Chunkag, V., Sethakul, P., Davat, B., & Hinaje, M. (2009). Comparative study of fuel-cell vehicle hybridization with battery or supercapacitor storage device. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58(8), 3892–3904. <https://doi.org/10.1109/TVT.2009.2028571>
- Toyota Motors. (2016). Toyota Reveals Exterior, Japan Price of Fuel Cell Sedan. Retrieved from https://global.toyota/en/newsroom/corporate/25271077.html?_ga=2.117795082.240637278.1563466

603-1238762025.1563466603

- Trojan Battery Company. (2016). Data Sheet Battery SAGM 12V 205Ah. *Trojan Battery Company*. Trojan Battery Company.
- Trovao, J. P. F., Roux, M. A., Menard, E., & Dubois, M. R. (2017). Energy- and power-split management of dual energy storage system for a three-wheel electric vehicle. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(7), 5540–5550. <https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2636282>
- Uebel, S., Murgovski, N., Tempelhahn, C., & Baker, B. (2018). Optimal Energy Management and Velocity Control of Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(1), 327–337. <https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2727680>
- Vafaei, M., & Kazerani, M. (2011). Optimal unit-sizing of a wind-hydrogen-diesel microgrid system for a remote community. *2011 IEEE PES Trondheim PowerTech: The Power of Technology for a Sustainable Society, POWERTECH 2011*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/PTC.2011.6019412>
- Vahedi, H., Noroozian, R., & Jalilvand, A. (2010). Optimal management of microgrid in island-mode using bacterial foraging algorithm. *International Review of Electrical Engineering*, 5(5), 2141–2151.
- Vinot, E., Trigui, R., Cheng, Y., Espanet, C., Bouscayrol, A., & Reinbold, V. (2014). Improvement of an EVT-based HEV using dynamic programming. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 63(1), 40–50. <https://doi.org/10.1109/TVT.2013.2271646>
- Yang, Y., Pei, W., & Qi, Z. (2012). Optimal sizing of renewable energy and CHP hybrid energy microgrid system. *2012 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia, ISGT Asia 2012*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ISGT-Asia.2012.6303122>
- Zamora, R., & Srivastava, A. K. (2010). Controls for microgrids with storage: Review, challenges, and research needs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.019>
- Zemansky, M., & Dittman, R. (1984). *Calor y Termodinámica* (6ta Ed.). New York City: McGraw-Hill.
- Zhang, D. (2013). *Optimal Design and Planning of Energy Microgrids*. University College London.
- Zhang, X., Sharma, R., & He, Y. (2012). Optimal energy management of a rural microgrid system using multi-objective optimization. *Innovative Smart Grid Technologies ...*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ISGT.2012.6175655>
- Zhao, B., Zhang, X., Li, P., Wang, K., Xue, M., & Wang, C. (2014). Optimal sizing, operating strategy and operational experience of a stand-alone microgrid on Dongfushan Island. *Applied Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.015>