



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Intensificación de la eficiencia energética para un sistema energético multidominio por intervención directa en su dinámica

Gerardo José Amador Soto (M. Eng.)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Procesos y Energía

Medellín, Colombia

2024



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Intensification of energy efficiency for a multidomain energy system through direct intervention in its dynamics

Gerardo José Amador Soto (M. Eng.)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Procesos y Energía

Medellín, Colombia

2024

Intensificación de la eficiencia energética para un sistema energético multidominio por intervención directa en su dinámica

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de
Doctor en Ingeniería – Sistemas Energéticos

Director

PhD. Jesús Antonio Hernández Riveros

Línea de Investigación

Eficiencia Energética

Grupo de Investigación

Grupo de Investigación en Inteligencia Computacional (GIIC)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento Energía y Procesos

Medellín, Colombia

2024

He hecho un esfuerzo incesante para no ridiculizar, no lamentar, no despreciar las acciones
humanas, sino para entenderlas.

(I have made a ceaseless effort not to ridicule, not to bewail, not to scorn human actions, but
to understand them.)

Sedulo curavi, humanas actiones non ridere, non lugere, neque detestari, sed intelligere.

Benedictus de Spinoza (1632-1677)

Dedicatoria

A mi familia: A Norma y Avilio, mis padres. A Elvia, mi tía; a Humberto y Fernando, mis hermanos; y a todas las personas que entregaron parte de sus vidas en este proceso de formación como persona, profesional de la ingeniería e investigador. Mi eterna gratitud.

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Gerardo José Amador Soto

27/01/2024

Agradecimientos

Agradezco al profesor PhD. Jesús Antonio Hernández Riveros, por su disposición para inquirir de forma conjunta en la materia expuesta en este trabajo. Gracias a su apoyo me fue posible reconocer el principio creativo dentro de esta labor, actividad que me ha sido compartida y deseo ejercer con la misma vocación y disposición hacia un aprendizaje significativo que aporte mayor comprensión y vinculación al proceso continuo de exploración y reconocimiento de la verdad.

Finalmente, este trabajo de investigación responde a una necesidad profunda de comprender el vasto mundo de las relaciones y las dinámicas complejas que emanan de ellas. El entendimiento recibido a través de los sentidos y el lenguaje, la intención y el error como también la interpretación, son aspectos imprescindibles de la ingeniería, la ciencia y la libre expresión. Agradezco la oportunidad de compartir mi experiencia en estas áreas.

Resumen

El uso eficiente de la energía es actualmente un objetivo global para mejorar la calidad de vida y promover el progreso económico y social. Los sistemas dinámicos de múltiples dominios energéticos integran diversas formas de energía (mecánica, eléctrica, térmica, neumática y química) para satisfacer variadas necesidades de producción y consumo. Estos sistemas complejos, presentes en equipos y maquinaria de todo tipo, se caracterizan por sus múltiples componentes altamente interrelacionados. Tradicionalmente, el análisis de estos sistemas bajo un enfoque reduccionista motivado por la simplificación propendió a la omisión de sus dinámicas internas, limitando el desarrollo de nuevas estrategias operativas basadas en su naturaleza dinámica y compleja. Este trabajo propone una estrategia para intensificar la eficiencia energética de estos sistemas, considerando su manifestación física real. Mediante una estructura de control inteligente basada exclusivamente en comportamiento medible, se evalúa y proponen nuevas trayectorias de comportamiento disponibles bajo condicionantes de operación sujetas a influencias del entorno. Los resultados demuestran la efectividad del método al lograr con precisión los objetivos operativos deseados, utilizando menos energía de la fuente de inyección de potencia del sistema.

Palabras clave: Eficiencia energética, sistema energético multidominio, modelado unificado basado en energía, control basado en comportamiento, enfoque comportamental para sistemas abiertos e interconectados, aprendizaje evolutivo de trayectorias.

Abstract

Intensification of energy efficiency for a multidomain energy system through direct intervention in its dynamics

Efficient energy use is currently a global objective to improve quality of life and promote economic and social progress. Dynamic multi-domain energy systems integrate various forms of energy (mechanical, electrical, thermal, pneumatic, and chemical) to meet diverse production and consumption needs. These complex systems, present in equipment and machinery of all types, are characterized by their multiple highly interrelated components. Traditionally, the analysis of these systems under a reductionist approach motivated by simplification tended to omit their internal dynamics, limiting the development of new operational strategies based on their dynamic and complex nature. This work proposes a strategy to intensify the energy efficiency of these systems, considering their real physical manifestation. Through an intelligent control structure based exclusively on measurable behavior, new available behavioral trajectories are evaluated and proposed under operating conditions subject to environmental influences. The results demonstrate the effectiveness of the method by accurately achieving the desired operational objectives while using less energy from the system's power injection source.

Keywords: Energy efficiency, multidomain energy system, energy-based unified modeling, behavior-based control, behavioral approach for open and interconnected systems, evolutionary learning of trajectories.

Contenido

Lista de Figuras.....	12
Lista de Tablas	14
1. Introducción	16
1.1 Justificación	17
1.2 Objetivos.....	21
1.2.1 Objetivo general.....	21
1.2.2 Objetivos específicos.....	21
2. Revisión de la Literatura	22
2.1 Acercamientos para la intensificación de la eficiencia energética de sistemas energéticos multidominio	22
2.2 Reducción de consumo energético por intervención en su dinámica interna	22
2.3 A modo de resumen	31
3. Marco Teórico	33
3.1 Visión sistémica holística de la energía.....	33
3.2 Sistemas dinámicos multidominio	34
3.3 Modelado de sistemas multidominio	36
3.3.1 Paradigmas de modelado para un sistema dinámico multidominio	37
3.3.2 Modelado con base en energía.....	38
3.4 Intervención en la dinámica interna de sistemas de múltiples dominios energéticos con correspondencia física real	50
3.4.1 La filosofía del enfoque comportamental para el control de sistemas abiertos e interconectados	51
3.5 El proceso de aprendizaje de trayectorias de comportamiento	55
3.6 A modo de resumen	55
4. Estrategia para la Intensificación de la E.E. de un S.M. por Intervención Directa En su Dinámica	60

5. Aplicación de la Estrategia: Caso de Estudio Sistema de Refrigeración por Compresión de Vapor	63
5.1 Representación del sistema natural	63
5.1.1 Reconocimiento comportamental del fenómeno energético	63
5.1.2 Representación sistémica del fenómeno con correspondencia física real.....	64
5.1.3 Visualización y evaluación del comportamiento natural y consumo energético base sujeto a condiciones de operación específicas.....	74
5.2 Aprendizaje de trayectorias comportamentales	77
5.2.1 Selección de puntos de intervención con correspondencia física real	77
5.2.2 Representación sistémica del fenómeno intervenido con correspondencia física real	79
5.2.3 Experimentación a través de la intervención directa en su dinámica interna	80
5.2.4 Análisis del comportamiento (medición, interpretación y evaluación) para la intensificación de la eficiencia energética y sujeto a condiciones de operación específicas y restricciones	81
6. Resultados	83
6.1 Intervención No. 1 en la velocidad del compresor. Control On-Off (SISO)	83
6.2 Intervención No. 2 en la velocidad del compresor y la apertura de la válvula de expansión. Control On-Off (MIMO).....	84
6.3 Intervención No. 3 en la velocidad del compresor. Control Continuo (SISO).....	86
6.4 Intervención No. 4 en la velocidad del compresor y la apertura de la válvula de expansión. Control Continuo (MIMO)	89
7. Conclusiones y Recomendaciones	92
7.1 Conclusiones	92
7.2 Recomendaciones y Trabajo Futuro.....	93
7.3 Bibliografía	94

Lista de Figuras

Figura 1: Representación básica de un sistema como conjunto de relaciones entre objetos. .34	34
Figura 2: Representación general de la estructura de un sistema como la interacción mutua entre subsistemas bajo influencia del entorno y estímulos externos.....35	35
Figura 3: Representación de un Sistema energético multidominio para un sistema de refrigeración por compresión de vapor.36	36
Figura 4: Conjunto de diagrama de bloques de submodelos en un entorno numérico.....38	38
Figura 5: Un solo modelo para el entorno numérico mediante teorías unificada.39	39
Figura 6: Representación de la información mediante la técnica de modelado BG y asignación causal.....43	43
Figura 7: Elementos Bond Graph.....46	46
Figura 8: Ejemplos de fuentes de esfuerzo y flujo que incluyen (a) una fuente de voltaje, (b) una fuente de corriente, (c) una entrada de fuerza externa y (d) una entrada de velocidad externa46	46
Figura 9: Ejemplos de elementos C: (a) un resorte, (b) un eje de torsión, (c) un capacitor eléctrico y (d) un acumulador hidráulico.....47	47
Figura 10: Ejemplos de elementos I: (a) una masa, (b) una inercia de torsión, (c) un inductor eléctrico y (d) una inercia hidráulica.47	47
Figura 11: Ejemplos de elementos R de puerto único que incluyen (a) un amortiguador mecánico, (b) un cojinete de rodillos, (c) una resistencia eléctrica y (d) una válvula hidráulica.48	48
Figura 12: Ejemplos de elementos TF que incluyen (a) una palanca rígida, (b) un par de engranajes, (c) un transformador eléctrico y (d) un pistón hidráulico.....48	48
Figura 13: Ejemplos de elementos GY que incluyen (a) un motor eléctrico ideal y (b) una bomba centrífuga ideal.....49	49
Figura 14: Conceptualización holística de un sistema energético.57	57
Figura 15: Reconocimiento de las dinámicas internas y las interacciones entre componentes.57	57
Figura 16: Ejemplo del proceso de representación de un sistema energético con correspondencia física real y la identificación de oportunidades para la intensificación de la eficiencia energética.....58	58
Figura 17: Estrategia para la identificación de oportunidades en eficiencia energética. 58	58
Figura 18: Distintas opciones de intensificación de la eficiencia energética por intervención utilizando la analogía de un sistema hidráulico.....60	60
Figura 19: Temperatura-entropía para el ciclo térmico de un SRCV.....64	64
Figura 20: a) Diagrama básico de un SRCV b) Elementos en un refrigerador doméstico.64	64
Figura 21: Diagrama básico de la parte térmica de un SRCV y su diagrama eléctrico análogo.65	65

Figura 22: Fase de enfriamiento y calentamiento para la temperatura en la cámara fría y el evaporador. Reproducido de (Schné et al., 2015).....	66
Figura 23: Procedimiento sistemático para obtener el modelo BG del ciclo térmico	67
Figura 24: Representación de enlace de potencia del ciclo térmico utilizando la técnica BG.....	67
Figura 25: Esquema de un sistema electromecánico.	67
Figura 26: Representación mediante BG para el compresor.	68
Figura 27: Unión modular del ciclo térmico y el grupo motor-compresor mediante la técnica BG.....	68
Figura 28: Asignación de flujos y esfuerzos para cada enlace de potencia	68
Figura 29: Representación por BG del circuito térmico que incluye el sobrecalentamiento.	72
Figura 30: Unión modular del ciclo térmico completo y el grupo motor-compresor mediante BG, con asignación de flujos y esfuerzos para cada enlace de potencia.....	73
Figura 31: Comparación de la temperatura en el evaporador y en la cámara fría entre el modelo térmico experimental y el modelo integral del SRCV	75
Figura 32: Otras variables de estado (dinámicas internas) del modelo integral del SRCV.....	75
Figura 33: Simulación del comportamiento real frente al modelo térmico experimental. Temperatura en la cámara fría (azul) y temperatura en el evaporador (rojo). Tomado de (Schné et al., 2015).....	76
Figura 34: Comportamiento de encendido y apagado logrado con el modelo integral del SRCV.	77
Figura 35: Selección de los puntos de intervención con base en el reconocimiento del sistema.	78
Figura 36: Representación para la intervención directa de un sistema multidominio a partir del control de velocidad del compresor.....	80
Figura 37: Representación para la intervención directa de un sistema multidominio a partir del control de velocidad del compresor y el grado apertura de la válvula de expansión.....	80
Figura 38: Trayectorias de comportamiento de la temperatura de salida aplicando las estrategias de intervención en el SRCV	82
Figura 39: Trayectorias de comportamiento de la corriente eléctrica y la velocidad del motor aplicando estrategias de intervención en el SRCV	82
Figura 40: Comportamientos del sistema interviniendo el compresor en modo discreto.....	84
Figura 41: Comportamientos del sistema interviniendo el compresor y la válvula de expansión en modo discreto.	86
Figura 42: Comportamientos del sistema interviniendo el compresor en modo continuo sin restricciones de estabilidad.	87
Figura 43: Comportamientos del sistema interviniendo el compresor en modo continuo con restricciones de estabilidad.	88
Figura 44: Comportamientos del sistema interviniendo el compresor y la válvula de expansión en modo continuo con restricciones de estabilidad.....	90

Lista de Tablas

Tabla 1: Variables de potencia generalizadas, analogía para cada dominio de energía.	42
Tabla 2: Variables energéticas generalizadas, analogía para cada dominio energético.	44
Tabla 3: Muestra la equivalencia entre las variables BG (variables del fondo) y las variables físicas	69
Tabla 4: Variables del modelo energético integral del SRCV (primera versión).....	70
Tabla 5: Ecuaciones diferenciales del SRCV completo sin sobrecalentamiento.....	71
Tabla 6: Ecuaciones diferenciales del sistema de refrigeración	73
Tabla 7: Parámetros del modelo integral del SRCV.....	74
Tabla 8: Consumo energético por tipo de intervención.	90

Parte I. Contexto General

1. Introducción

Históricamente, la energía ha sido una idea en constante evolución. En la antigüedad, las culturas griega y china hablaban de una fuerza vital que animaba la realidad. Sin embargo, fue durante la Revolución Científica en los siglos XVII y XVIII cuando la energía comenzó a ser conceptualizada en términos más científicos. Thomas Young y Hermann von Helmholtz desarrollaron teorías sobre la conservación de la energía, estableciendo una relación entre sus diversas formas y el trabajo mecánico. Desde esta visión, el concepto comúnmente utilizado de energía estaba definido por la capacidad de realizar trabajo. Con el tiempo esta postura objetivista del concepto, marcada por la intervención indiscriminada de recursos naturales, manifiesta en el desarrollo industrial de las grandes potencias económicas y los hábitos de consumo de sociedades más tecnificadas, derivó para algunos contextos del planeta en problemáticas de carácter ambiental, económico y social, influyendo a su vez en los medios de extracción, transformación y uso de las fuentes naturales de energía. Con la inclusión de conceptos como la sostenibilidad, una nueva visión para el uso de la energía busca establecer un equilibrio entre la actividad económica, el bienestar social y su impacto ambiental.

Lograr desarrollar procesos articulados de generación, intercambio y transformación energética sostenible es un reto complejo y exigente, ya que implicaría el desarrollo de soluciones que integren múltiples condicionantes, desde distintos campos del conocimiento como ser las ciencias naturales, ingeniería, ciencias y tecnología sociales (Holdren, 2007). Autores como Rosen & Farsi proponen acciones conjuntas para obtener recursos energéticos sostenibles, impulsar la eficiencia de los sistemas energéticos, mitigar los impactos ambientales y abordar aspectos no técnicos como los niveles de vida y la asequibilidad (Rosen & Farsi, 2022). Sin embargo, todavía son limitadas las propuestas articuladas que propicien acciones conjuntas en torno a esta problemática.

A menor escala, existen múltiples ejemplos de soluciones para la gestión inteligente y sostenible de sistemas energéticos complejos para distintas aplicaciones. Sin embargo, esta área todavía sigue en desarrollo y las propuestas no se extienden a otros tipos de sistemas. (Cheng et al., 2018; X. Han, 2012; Haoye et al., 2020; Junsheng, 2016).

Para ello, este trabajo centra sus esfuerzos en el reconocimiento de estrategias para intensificar la eficiencia energética de un sistema dinámico de múltiples dominios energéticos (eléctrico, mecánico, hidráulico, térmico, etc.) utilizando el concepto unificador de la energía como punto de convergencia para comprender de forma integral el intercambio de flujos de potencia, materialidad e información entre elementos altamente acoplados. Esta visión unificada descrita por la relación y la interdependencia entre componentes diversos permite la posibilidad de identificar y aprender de forma autónoma nuevas rutas de comportamiento, estimuladas desde las relaciones internas de sus componentes individuales para que, como conjunto, sean capaces de alcanzar los objetivos de operación deseados en equilibrio con su entorno.

Algunos aspectos a destacar de este trabajo es la búsqueda de estrategias que partan de una correspondencia física real en el reconocimiento, representación e intervención de fenómenos energéticos multidominio, esto con el interés de proponer soluciones prácticas basadas en los comportamientos medibles del sistema, es decir, no condicionada por un modelo o controlador en específico.

Finalmente, para su verificación, se presenta un caso de aplicación en un sistema energético multidominio de tipo industrial, el cual, se ha formulado con base en principios comunes para múltiples sistemas energéticos dinámicos multidominios, de mayor o menor escala, proyectando la posibilidad de su implementación en casos de mayor complejidad que involucre procesos interrelacionados de intercambio de energía, materialidad e información. aspecto que puede ser clave para comprender y desarrollar propuestas de solución sostenibles en sistemas y/o procesos complejos.

1.1 Justificación

La capacidad del hombre para usar y controlar la energía a través de la técnica y posteriormente la tecnología ha jugado un papel crucial en su dominio en la Tierra (Hewitt, 2022a; Seleem, 2023). El origen de la tecnología se remonta a los primeros días de la evolución humana cuando los proto-humanos comenzaron a cazar animales más grandes en grupos debido a sus limitaciones físicas en comparación con otros depredadores (Ayres, 2016). Esta relación entre energía y tecnología es crucial para el bienestar de la especie humana, manifiesta en la actualidad a través del desarrollo humano y económico, ya que la demanda de energía ha crecido significativamente a lo largo del último siglo (Surana et al., 2013). No obstante, el uso de energía también tiene consecuencias negativas, como la pérdida de biodiversidad y el cambio climático (Cicchella, 2023). Para abordar estos temas, el desarrollo de estrategias que integren la conservación de energía, la eficiencia y el uso de fuentes de energía renovables son cruciales.

- **La necesidad de la energía y de intensificar su eficiencia en sistemas complejos**

La eficiencia energética para el caso de sistemas dinámicos de múltiples dominios energéticos es importante por varias razones. En primer lugar, en el caso de las empresas y/o organizaciones puede conducir al ahorro de recursos al reducir los costos operativos y mejorar la rentabilidad (Azieva, 2023). En segundo lugar, para estructuras de tipo civil puede ayudar a reducir el impacto negativo en el medio ambiente al disminuir las emisiones y mejorar la calidad del aire exterior (Gupta & Chakraborty, 2021) y al mismo tiempo pueden proporcionar condiciones de vida cómodas para los ocupantes mientras minimizan el consumo de energía (Gillingham et al., 2021). Adicionalmente, la eficiencia energética puede contribuir a mitigar la pobreza energética y reducir la huella ambiental de los hogares (Marine, 2020). Por último, la eficiencia energética es un recurso crucial para lograr el acceso a la energía, ya que puede mejorar la confiabilidad y el rendimiento de un sistema establecido al tiempo que reduce la necesidad de inversiones adicionales en el suministro de energía (Jordan et al., 2017).

En general, las contribuciones en eficiencia energética ofrecen una amplia gama de beneficios que van más allá del ahorro de energía, convirtiéndolas en un componente importante de las estrategias de desarrollo sostenible. Intensificar la eficiencia energética de sistemas complejos de múltiples dominios energéticos no solo conduce a ahorros de energía y por tanto a una menor cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también puede traer otros beneficios ligados al bienestar común desde la búsqueda de soluciones conjuntas.

- **Reconocimiento integral de los fenómenos energéticos para una intervención sostenible en beneficio económico, social y ambiental.**

En general, la energía y su uso por los seres humanos tienen profundas implicaciones para la sociedad y el medio ambiente. La intervención humana en el contexto energético ha sido diversa y ha generado impactos significativos. Desde la construcción de represas hidroeléctricas para generar electricidad hasta la extracción de combustibles fósiles y el desarrollo de energía nuclear, nuestras acciones han modificado el entorno y sus ecosistemas. La adopción de energías renovables, como la eólica y solar, busca mitigar los impactos ambientales, aunque también plantea desafíos. En el ámbito urbano, la planificación de ciudades influye en el consumo de energía y su huella de carbono. La industrialización, si bien impulsa la producción, también contribuye a la contaminación. Estos ejemplos destacan la complejidad de equilibrar la necesidad energética con la sostenibilidad ambiental, resaltando la importancia de decisiones informadas y prácticas que minimicen los impactos adversos en el entorno y la sociedad.

Para ello es necesaria una visión integral del comportamiento de los sistemas para comprender los factores que influyen en el consumo de energía individual de los hogares y para diseñar intervenciones y políticas efectivas que incrementan la eficiencia energética como conjunto. Bajo una perspectiva integradora, la naturaleza multidimensional de los comportamientos energéticos requiere un enfoque holístico que considere variables psicológicas, habituales, estructurales y culturales en varios niveles, incluyendo el espectro contextual-amplio, meso-social y micro-individual (Lopes et al., 2015). Al identificar los factores socioeconómicos y las motivaciones detrás de los comportamientos de ahorro de energía, es posible segmentar a los consumidores de energía en diferentes tipos de comportamiento, que pueden indicar intervenciones dirigidas (Pothitou, 2015). Adicionalmente, la integración de técnicas de modelado y métodos de estructuración de problemas puede proporcionar una comprensión contextualizada de los comportamientos energéticos y su impacto en el consumo de energía (Pothitou et al., 2016). Reconociendo la importancia del papel de las personas en el logro de las transiciones energéticas y los objetivos de política climática, la colaboración interdisciplinaria entre ingenieros y científicos sociales es crucial para desarrollar métodos efectivos de investigación y desarrollo energético (Moezzi & Lutzenhiser, 2020).

En ese sentido, la intervención en el ámbito energético es esencial para el progreso humano, pero puede ser direccionada de manera estratégica y consciente de sus implicaciones para procesos de orden natural, social o económico, buscando equilibrios que permitan satisfacer las necesidades energéticas sin comprometer la sostenibilidad a largo plazo. Esto se proyecta

en el documento más recientes de la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés) resaltando los siguientes puntos:

Algunas conclusiones del documento (International Energy Agency, 2022)

- El marketing estratégico de la tecnología se centra en el servicio que proporciona y sus beneficios, como la mejora de la calidad de vida, ahorro de costos, estatus social y beneficios ambientales.
- Pensar de manera integral sobre los sistemas socioeconómicos es crucial para comprender la compleja dinámica entre la tecnología energética y el uso de la energía.
- El progreso tecnológico debe apuntar a niveles más altos de eficiencia en el uso de recursos y reducción de residuos para superar los límites de crecimiento impuestos por recursos naturales finitos.
- Las políticas de implementación tecnológica energéticamente eficiente, gestionadas estratégicamente y orientadas a objetivos, pueden acelerar la difusión de la tecnología, pero se requieren esfuerzos multisectoriales, multinacionales y multidisciplinarios para lograr la sostenibilidad global.
- El efecto rebote, donde el aumento en la eficiencia energética se ve contrarrestado por un aumento en la demanda de energía debido a la caída de los precios relativos, representa un desafío para lograr mejoras en la eficiencia energética.
- Las economías en desarrollo muestran una reducción en la intensidad energética debido al cambio tecnológico, mientras que los países desarrollados experimentan un cambio hacia procesos de fabricación menos intensivos en energía mediante cambios estructurales.

La sostenibilidad a largo plazo se convierte en un desafío crucial. La intervención en la extracción, procesamiento y uso de fuentes naturales de energía puede tener impactos significativos en el equilibrio de los ecosistemas, en las dinámicas sociales y en la estabilidad económica. La necesidad de comprender y encontrar equilibrios adecuados se vuelve imperativo, adoptando una perspectiva que considere las interrelaciones y las consecuencias de las intervenciones a sistemas energéticos en diferentes ámbitos y escalas. Un enfoque integrado que permita una comprensión holística de los desafíos y oportunidades asociados con la intervención en el ámbito energético, promoviendo soluciones más equitativas y sostenibles se considera de alta importancia para los retos actuales de la humanidad.

Este trabajo se enfoca en identificar estrategias para intensificar la eficiencia energética de sistemas dinámicos que abarcan diversos dominios energéticos. Este enfoque, aplicado a un sistema del tipo industrial, busca generar conocimientos y herramientas que pueden ser aplicadas en diversos contextos, contribuyendo así a la construcción de un futuro más sostenible y resiliente frente a los desafíos energéticos actuales y futuros.

Mediante un arduo proceso de exploración en relación a la energía y la eficiencia, resalto lo siguientes seis elementos de sumo interés para el estudio:

1. Manifestación energética concreta (expresión fenomenológica).
2. El reconocimiento comportamental del hecho (observación).
3. La autoconsciencia y la necesidad de la representación sistémica (abstracción) para su comprensión estructurada.
4. La experimentación (por intervención) para la obtención de información comportamental de sistema bajo condiciones de operación deseadas, ampliando y posteriormente delimitando el rango de posibilidades acorde a condicionantes del entorno.
5. El análisis (medición, interpretación y evaluación) para el aprendizaje continuo en función de un comportamiento deseado.
6. La retroalimentación de la información integrada a la autoconsciencia vinculada a la representación para proponer nuevas estrategias de intervención.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar una estrategia que permita identificar oportunidades para la intensificación de la eficiencia energética de un sistema multidominio por intervención directa en su dinámica, manteniendo los objetivos de operación deseados.

1.2.2 Objetivos específicos

- Modelar un caso de estudio de naturaleza multidominio (candidato: sistema de refrigeración) aplicando una técnica basada en los intercambios energéticos de sus componentes que permita representar la dinámica interna entre elementos constituyentes que interactúan entre sí y con su entorno en presencia de incertidumbres.
- Identificar y proponer estrategias de intervención en el caso de estudio para la intensificación de la eficiencia energética a partir de un reconocimiento de la planta con correspondencia física real.
- Establecer bajo el enfoque comportamental para sistemas abiertos e interconectados una estructura de control que permita intervenir directamente en la dinámica de la planta sin perder la correspondencia física real.
- Evaluar las estrategias definiendo criterios de operación, seguridad y consumo energético para las trayectorias comportamentales de la planta debido a la intervención directa en la dinámica del sistema.
- Validar las estrategias de intervención utilizando el caso de estudio para comparar cualitativa y cuantitativamente los comportamientos de la planta y el consumo energético de la/s fuente/s de inyección de potencia respectivamente, antes y después de la intervención.

2. Revisión de la Literatura

2.1 Acercamientos para la intensificación de la eficiencia energética de sistemas energéticos multidominio

El campo de la eficiencia energética en sistemas multidominio en ingeniería ha sido objeto de un creciente interés debido a su potencial para mitigar el consumo de energía y reducir el impacto ambiental. En este contexto, diversas estrategias han sido propuestas por investigadores y expertos en el campo, con el objetivo de mejorar la gestión y el rendimiento de estos sistemas. Entre estas estrategias se encuentran:

- **Optimización de la demanda de energía** (Craig B. Smith & Kelly E. Parmenter, 2016)
- **Integración de fuentes de energía renovable** (Lawrence E. Jones, 2017)
- **Gestión de la energía en tiempo real** (He & Huang, 2021)
- **Diseño y optimización del sistema** (Ibrahim Dincer et al., 2017)
- **Gestión inteligente de la carga** (Stuart Borlase, 2013)
- **Monitorización y análisis de datos** (Mashrur Chowdhury et al., 2017)
- **Educación y concienciación** (Bjørn H. Samset, 2016)

Nuestro enfoque se centra en la búsqueda y revisión de propuestas de investigación que desarrollen **estrategias que permitan identificar oportunidades para la intensificación de la eficiencia energética de un sistema multidominio por intervención directa en su dinámica.**

2.2 Reducción de consumo energético por intervención en su dinámica interna

Estrategias de intervención para mejorar la eficiencia energética en sistemas energéticos multidominios complejos típicamente involucran una combinación de intervenciones tecnológicas, operativas y políticas destinadas a optimizar el uso de la energía en múltiples dominios como electricidad, calefacción, refrigeración, transporte y procesos industriales. En este contexto, se ha explorado diversas direcciones y estrategias para abordar estos desafíos de manera integral, aquí se presentan algunas direcciones de investigación y estrategias como resultado de la revisión bibliográfica:

a) **Sistemas integrados de gestión energética (SIGE):**

Los sistemas integrados de energía tienen como objetivo optimizar el funcionamiento de diferentes fuentes de energía mediante la promoción de la complementariedad multi-energética. Esto implica coordinar los sistemas de suministro de energía y calor para maximizar la eficiencia energética y reducir las emisiones. Se identifican los factores clave que

afectan el consumo de energía del sistema, y se establece un modelo de evaluación integral para orientar la optimización de operación de sistemas complementarios multienergéticos (Jia et al., 2022). Para aumentar el acoplamiento entre varios sistemas, se han desarrollado modelos de planificación del sistema para satisfacer las demandas eléctricas, térmicas y de gas, asegurando un funcionamiento confiable y una mejor eficiencia de utilización de energía (Zhao et al., 2021). Los sistemas integrados de energía permiten la utilización multinivel de diferentes formas de energía, mejorando la tasa de consumo de energía renovable. El funcionamiento óptimo de los sistemas integrados de energía implica modelar los puntos de acoplamiento entre subsistemas energéticos, resolver problemas de optimización, y considerar el desarrollo del mercado de energía y futuros sistemas integrados de energía.

Las investigaciones en estos sistemas se centran en desarrollar plataformas de software avanzadas que integren varios dominios energéticos y permitan el monitoreo, control y optimización en tiempo real del uso de la energía. Se utilizan técnicas de teoría de control, optimización, inteligencia artificial y aprendizaje automático para ajustar dinámicamente el consumo de energía en función de factores externos como la demanda, los precios y la disponibilidad de fuentes de energía renovable.

b) Respuesta a la demanda (RD):

La respuesta a la demanda en los sistemas de energía implica coordinar múltiples actividades de respuesta a la demanda en diferentes sistemas de energía, como edificios, complejos industriales y redes de transporte. El propósito principal de la respuesta a la demanda es permitir que los usuarios multienergéticos respondan a los cambios en el consumo de energía no solo desplazando o reduciendo la demanda de energía, sino también cambiando el tipo de energía consumida en respuesta al centro de despacho. Los programas integrados de respuesta a la demanda en los centros de gestión pueden ayudar a reducir los costos de energía, mejorar la estabilidad de la red, aumentar la penetración de fuentes de energía renovables y proporcionar beneficios adicionales como una mejor eficiencia energética y una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Dzyuba et al., 2023; Innocent et al., 2023). El uso de sistemas de recursos energéticos distribuidos con respuesta a la demanda en sitios industriales también puede contribuir a una gestión energética efectiva y al ahorro de costos (Innocent et al., 2023). Las técnicas de gestión del lado de la demanda, incluida la respuesta a la demanda, son importantes para lograr un equilibrio entre la oferta y la demanda, optimizar la utilización de energía e integrar los recursos de energía renovable (Ajitha & Radhika, 2023).

En (Barbeito et al., 2017) presentan un caso aplicando una estrategia de intervención basado en el control estadístico de calidad (SQC) para analizar el estado real del confort térmico y la eficiencia energética de las oficinas de la empresa FRIDAMA (España). En este caso los ahorros energéticos y las intervenciones fueron ejecutadas a posteriori. Finalmente (Shaikh et al., 2016) implementa un sistema de control incorporado con un algoritmo genético evolutivo multi-objetivo para optimizar la gestión energética de los edificios.

Las investigaciones analizan estrategias para incentivar a los consumidores a ajustar sus patrones de consumo de energía en respuesta a señales de la red. Involucra la implementación de tecnologías de red inteligente, tarifas de tiempo de uso y sistemas de respuesta a la demanda automatizados para reducir la demanda máxima y mejorar la eficiencia del sistema en general.

c) Eficiencia energética en edificaciones:

La investigación se centra en la modelización y simulación de sistemas de gestión de energía para sistemas integrados de energía en edificios, enfocándose en minimizar los costos operativos y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. El desarrollo de sistemas avanzados de gestión energética de edificaciones (SGEE) que optimicen el uso de calefacción, refrigeración, iluminación y electrodomésticos incluye estrategias técnicas de diseño pasivo, aislamiento de edificios, electrodomésticos eficientes energéticamente, sistemas HVAC inteligentes y controles basados en la ocupación (Rane et al., 2022).

d) Optimización de procesos industriales:

Los sistemas de gestión energética en aplicaciones industriales han recibido menos atención de investigación en comparación con los sistemas residenciales. No obstante, existe la necesidad de tales sistemas debido a los retos que plantea la expansión de los recursos de energía renovable y su carácter intermitente (Sievers & Blank, 2023). Las técnicas de control deterministas y difusas basadas en reglas se han evaluado con éxito para estrategias de control, mientras que las técnicas basadas en optimización en tiempo real han demostrado ser prometedoras en pruebas a escala de laboratorio (Hoyler, 2023; Yu et al., 2022). También se ha explorado la tecnología gemela digital para la gestión y optimización de la energía en las industrias de procesos y energía.

e) Eficiencia en el transporte

Las investigaciones exploran estrategias para promover sistemas de transporte eficientes en energía, incluyendo vehículos eléctricos, híbridos, transporte público y sistemas de transporte inteligente. Este tipo de iniciativas se respaldan en los sistemas de gestión de energía para aplicaciones de vehículos eléctricos los cuales han sido evaluados a fondo en varios trabajos de investigación. Estos sistemas tienen como objetivo optimizar el uso de dispositivos de almacenamiento de energía mediante algoritmos de control para mejorar el rendimiento del vehículo y la vida útil de la batería (Wangsupphaphol et al., 2023). En estos estudios se analizan las características de los vehículos eléctricos, la arquitectura del sistema híbrido de almacenamiento de energía, la topología del convertidor y las técnicas de gestión de energía. Las técnicas de control deterministas y difusas basadas en reglas se han evaluado con éxito utilizando experimentos con vehículos a escala real, mientras que las técnicas de gestión de energía basadas en optimización en tiempo real han demostrado ser prometedoras en pruebas a escala de laboratorio (Uparikar & Jumale, 2020). Se ha encontrado que el uso de supercondensadores en combinación con baterías reduce el estrés y mejora la duración de la batería al limitar la corriente (Ziyong Song, 2022).

f) Gestión de microrredes basados en sistemas integrados de energía renovable

Los enfoques de planificación de microrredes basados en sistemas integrados de energía renovable han sido ampliamente estudiados en la literatura. Se han propuesto diversos modelos de optimización y algoritmos para enfrentar los retos de incorporar fuentes de energía renovable (RES) a las microrredes. Estos enfoques consideran aspectos económicos, gestión energética, incertidumbre de carga, y la presencia de diferentes fuentes de energía (Hasan et al., 2023; Kiptoo et al., 2023; Tian et al., 2023; Ullah et al., 2023; Zubidi et al., 2023). En general, estos estudios proporcionan información valiosa sobre la planificación y análisis óptimos de los sistemas integrados de energía renovable en microrredes

g) Integración entre dominios:

Los sistemas integrados de energía (SIE) se consideran una forma prometedora de lograr un futuro energético más seguro, confiable, sostenible y asequible. Estos sistemas maximizan la eficiencia del suministro de energía mediante la combinación de tecnología de energía eléctrica, tecnología de distribución de energía y tecnologías térmicas. Un ejemplo de ello es al utilizar el desperdicio térmico de plantas de energía, industrias basadas en hornos o proporcionando calefacción, refrigeración y control de humedad en los edificios. Sin embargo, el desarrollo de estos sistemas requiere conocimiento interdisciplinario y consideración de prioridades políticas como de limitaciones técnicas (Andrei Morch et al., 2023; Jing et al., 2023; L Pei et al., 2023; Maheedhar, 2023).

h) Analítica de datos y sistemas de soporte para la toma de decisiones:

El análisis de datos, los modelos de simulación y los sistemas de apoyo a la toma de decisiones se utilizan para analizar patrones de consumo de energía, identificar ineficiencias y recomendar estrategias de optimización (Arronategui et al., 2023; Ishankhodjayev & Sultanov, 2022). Estos enfoques implican la recopilación y análisis de big data para apoyar la toma de decisiones en la industria y las organizaciones públicas (Ishankhodjayev & Sultanov, 2022). La simulación, específicamente utilizando el formalismo de la red Petri, se utiliza para simular eficientemente sistemas complejos de eventos discretos sobre grandes infraestructuras computacionales (Peña et al., 2022). Se proponen sistemas de información inteligentes para abordar los problemas y deficiencias en el funcionamiento de los sistemas energéticos (Kaya, 2022). Estos sistemas utilizan modelos, algoritmos y bases de datos para apoyar los procesos de toma de decisiones en el sector energético. La intervención directa de múltiples sistemas energéticos puede conducir a limitaciones y desafíos en términos de su comportamiento dinámico.

i) Garantizando condiciones de operación de los procesos que presentan variaciones de la demanda o bajo presencia de perturbaciones.

Para el caso, (Dubois, 1987) presenta un acercamiento por optimización multiobjetivo para el proceso de corte de metal, logrando condiciones de corte óptimos para una máquina aplicando aritmética difusa y programación lineal. Un trabajo más reciente (Zhang et al., 2014) mediante

un controlador PID optimizado por control predictivo basado en modelo (MPC) logra obtener valores de temperatura deseados para el funcionamiento de un reactor surfactante, reduciendo implícitamente el consumo de energía en la planta.

En (Serale et al., 2018) se implementaron algoritmos MPC para regular edificios y sus sistemas HVAC, explotando completamente el potencial de la construcción de masa térmica. Para el caso hubo reducción implícita del consumo energético, con dificultades para evaluar cuantitativamente los beneficios potenciales que se pueden lograr por medio de una estrategia de control. También (Hu et al., 2017) construye un controlador predictivo basado en modelo para maximizar el uso del combustible optimizando la velocidad del vehículo y la relación de transmisión continuamente variable. (Chuang et al., 2018) Presenta una tecnología de control de velocidad constante aplicada a los equipos de proceso de fabricación. Los cambios en la potencia de salida del motor eléctrico variaron junto con diferentes cargas de proceso, por lo que se puede ahorrar electricidad innecesaria a bajas cargas lo que reduce el consumo de energía. La técnica no afecta a la máquina, ya que solo modula la carga de acuerdo con la variación. Las mejoras en eficiencia energética son indirectas.

j) Por reducción de pérdidas para procesos o máquinas específicas.

Se destaca el trabajo presentado por (Hazi et al., 2009) quienes abordan el tema de la optimización en eficiencia energética para el suministro de energía aplicado a la fabricación de papel. Este acercamiento se enfoca en función de la reducción de pérdidas para el servicio de suministro de energía. En (Chaudhary & Dubey, 2016) se obtiene la reducción de pérdidas para un motor de inducción utilizando el método de control "Loss Model Control + Search Control" con base en la aplicación de redes neuronales artificiales. Otro caso es el presentado por (Schné et al., 2018) quienes implementan un esquema de control predictivo aplicado a un modelo de refrigerador doméstico con base en la obtención de datos de precios reales de las tarifas de energía. Su propuesta busca que el sistema actúe de manera reactiva las tarifas de consumo de energía por hora cambiando sus períodos operativos a intervalos de tiempo con tarifas menos costosas, por lo que minimiza la factura de energía del consumidor. Como un "efecto secundario", el consumo de energía disminuye durante los períodos pico. En otro acercamiento (Shin et al., 2017) presenta una metodología de modelado de energía basada en componentes para implementar la optimización en línea necesaria para control en tiempo real. En ella se busca seleccionar parámetros óptimos de corte para un sistema mecanizado de fresado. Los modelos de componentes predicen el consumo de energía utilizando modelos de regresión o de redes neuronales. En este trabajo se destacan las dificultades de monitorear todas las métricas en consumo energético para a nivel de planta.

k) Mediante la sintonización óptima de controladores.

(O'Dwyer, 2006) ilustra cómo es posible reducir los costos de energía optimizando el ajuste del controlador PID. De forma similar (Wang & Wang, 2003) presentan la implementación de operadores difusos en conjunto con un algoritmo genético simple (Fuzzy-GA) para optimizar los parámetros del controlador aplicado al control de temperatura para un proceso de fermentación. El control óptimo puede garantizar menor consumo energético en el propio

sistema de control, pero no necesariamente reduce el consumo en la planta, si esto se logra es de forma indirecta. De igual manera (Choudhary & Choudhary, 2017) propone una nueva técnica para la operación eficiente de motores de inducción implementando un control de flujo óptimo en condiciones de carga parcial.

Resumen

Exploración bibliográfica para la Intensificación de la Eficiencia Energética de Sistemas Multidominio.

a) Garantizando condiciones de operación de los procesos que presentan variaciones de la demanda o bajo presencia de perturbaciones.

No	Título	Año o Período	Énfasis	Citación
1	An application of fuzzy arithmetic to the optimization of industrial machining processes	1987	Optimización multiobjetivo para el proceso de corte de metal, logrando condiciones de corte óptimos.	(Dubois, 1987)
2	Predictive control optimization based PID control for temperature in an industrial surfactant reactor	2014	Mediante un controlador PID optimizado por control predictivo basado en modelo (MPC) logra obtener valores de temperatura deseados para el funcionamiento de un reactor surfactante.	(Zhang et al., 2014)
3	Model Predictive Control (MPC) for Enhancing Building and HVAC System Energy Efficiency: Problem Formulation, Applications and Opportunities	2018	Implementación de algoritmos MPC para regular edificios y sus sistemas HVAC, explotando completamente el potencial de la construcción de masa térmica.	(Serale et al., 2018)
4	Cyber-Physical Control for Energy-Saving Vehicle Following with Connectivity	2017	Construcción de un controlador predictivo basado en modelo para maximizar el uso del combustible optimizando la velocidad del vehículo y la relación de transmisión continuamente variable.	(Hu et al., 2017)
5	Energy saving technique for natural stone cutting machine by constant speed control in stone industry	2018	Presenta una tecnología de control de velocidad constante aplicada a los equipos de proceso de fabricación.	Chuang et al., 2018)

b) Por reducción de pérdidas para procesos o máquinas específicas.

No	Título	Año o Período	Énfasis	Citación
6	Increase of paper mill energy efficiency by optimization energy supply system industry	2009	Se enfoca en función de la reducción de pérdidas para el servicio de suministro de energía	(Hazi et al., 2009)
7	Efficiency optimization of induction motor drive in steady-state using artificial neural network	2016	Por reducción de pérdidas para un motor de inducción utilizando el método de control "Loss Model Control + Search Control" con base en la aplicación de redes neuronales artificiales	(Chaudhary & Dubey, 2016)
8	Energy efficiency of milling machining: Component modeling and online optimization of cutting parameters	2017	Modelado de energía basada en componentes para implementar la optimización en línea necesaria para control en tiempo real	(Shin et al., 2017)
9	Embeddable adaptive model predictive refrigerator control for cost-efficient and sustainable operation	2018	Implementan un esquema de control predictivo aplicado a un modelo de refrigerador doméstico con base en la obtención de datos de precios reales de las tarifas de energía	(Schné et al., 2018)

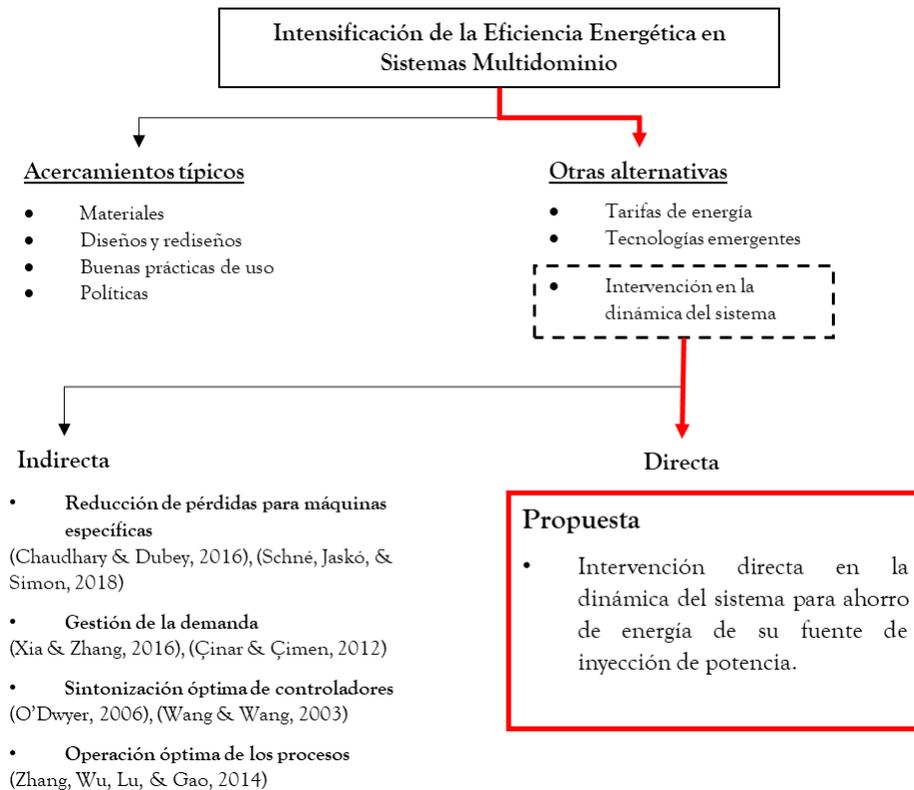
c) Mediante la sintonización óptima de controladores.

No	Título	Año o Período	Énfasis	Citación
10	Reducing energy costs by optimizing controller tuning	2006	Reducir los costos de energía optimizando el ajuste del controlador PID	(O'Dwyer, 2006)
11	Parameter optimization in complex industrial process control based on improved fuzzy-GA	2003	Implementación de operadores difusos en conjunto con un algoritmo genético simple (Fuzzy-GA) para optimizar los parámetros del controlador	(Wang & Wang, 2003)

13	Efficiency optimization of pump motor drive at steady-state condition	2017	Implementando un control de flujo óptimo en condiciones de carga parcial para la operación eficiente de motores de inducción	(Choudhary & Choudhary, 2017)
----	---	------	--	-------------------------------

d) Por gestión de la demanda.

No	Título	Año o Período	Énfasis	Citación
14	Industrial energy systems in view of energy efficiency and operation control	2016	Bajo el método de gestión de la demanda (DSM) y el Modelo de Control Predictivo (MPC) en condiciones de robustez, se permite la operación óptima de un proceso industrial periódico, planteando condiciones de minimización del costo energético.	(Xia & Zhang, 2016)
15	On the Investigation of the Energy Efficiency Using PID and Fuzzy Logic Controllers in a Marble Machine	2012	Proponen reducir el consumo energético para el proceso de corte circular de mármol mediante el diseño por lazo cerrado para dos controladores (PID y Lógica Difusa) que actúen directamente en la velocidad de desplazamiento de la sierra.	(Çinar & Çimen, 2012)
16	Assessing thermal comfort and energy efficiency in buildings by statistical quality control for autocorrelated data.	2017	Presentan un caso aplicando una estrategia de intervención basado en el control estadístico de calidad (SQC) para analizar el estado real del confort térmico y la eficiencia energética de las oficinas de la empresa FRIDAMA (España).	(Barbeito et al., 2017)
17	Intelligent multi-objective control and management for smart energy efficient buildings	2016	Implementa un sistema de control incorporado con un algoritmo genético evolutivo multi-objetivo y un algoritmo genético híbrido multi-objetivo para optimizar la gestión energética de los edificios.	(Shaikh et al., 2016)



Algunas conclusiones resultado de la revisión bibliográfica:

- En los trabajos se discute el uso de estrategias de optimización con plataformas integradas de simulación para asegurar la efectividad y confiabilidad de sistemas integrados de energía.
- Los trabajos proponen un enfoque complejo para los proyectos de ahorro energético en instalaciones comerciales e industriales, que incluye identificar e implementar medidas óptimas de ahorro y considerar el comportamiento dinámico.
- El análisis de datos y los sistemas inteligentes de información se han empleado para modelar y optimizar la eficiencia energética, como en edificios inteligentes, lo que puede ayudar a comprender y administrar el comportamiento dinámico de múltiples sistemas de energía.
- El desarrollo y aplicación de sistemas inteligentes de información en el sector energético puede atender las problemáticas y carencias asociadas al comportamiento dinámico de los sistemas energéticos.

- La adopción de una metodología de modelado sustentada en un marco cohesivo, como el formalismo de la red Petri, puede facilitar la simulación eficiente de sistemas complejos de eventos discretos y ayudar a comprender el comportamiento dinámico de múltiples sistemas de energía.

Estas referencias proporcionan una base sólida para comprender las estrategias de gestión energética integrada y los enfoques para mejorar la eficiencia energética en sistemas energéticos multidominios complejos por intervención directa.

2.3 A modo de resumen

Al revisar las estrategias propuestas para intensificar la eficiencia energética de sistemas energéticos complejos multidominio, es posible identificar algunos vacíos que podrían limitar su aplicabilidad o replicabilidad en diferentes contextos. En específico se resalta:

Complejidad del sistema: Los sistemas energéticos dinámicos de múltiples dominios energéticos implican interacciones entre varios componentes, como generadores, dispositivos de almacenamiento y consumidores, en diferentes dominios (electricidad, calefacción, refrigeración y transporte). Gestionar y optimizar tales sistemas requiere comprender sus intrincadas dinámicas e interdependencias.

Falta de enfoque integrador: A menudo, las estrategias se centran en aspectos específicos del sistema, como el análisis de la demanda energética o la evaluación de la eficiencia de los componentes sin profundizar de manera integral en operación conjunta de los sistemas multidominio. Esto puede llevar a soluciones parciales que no optimizan completamente el rendimiento energético del sistema en su conjunto.

Limitaciones de modelado y simulación: Aunque la modelización y simulación son herramientas poderosas para comprender el comportamiento de los sistemas energéticos, existen limitaciones en la precisión y representación de la realidad. Los modelos simplificados, como el uso de formalismos monodisciplinarios, pueden pasar por alto ciertos aspectos importantes del sistema, lo que puede afectar la capacidad para identificar oportunidades de ahorro energético de manera precisa.

Optimización y control: Optimizar la operación de sistemas energéticos multidominio implica resolver problemas de optimización de alta dimensión en tiempo real. Desarrollar algoritmos de control avanzados que puedan adaptarse a condiciones cambiantes e incertidumbres mientras se garantiza la estabilidad y eficiencia del sistema es un desafío significativo.

Toma de decisiones basada en datos: La disponibilidad y calidad de los datos son fundamentales para la toma de decisiones informadas en la gestión de la energía. Mejorar la recopilación, análisis y utilización de datos energéticos, así como desarrollar sistemas de

soporte para la toma de decisiones basados en datos, puede ayudar a optimizar el rendimiento energético de los sistemas.

Es por esto por lo que es necesario un enfoque de intervención integradora que aborde la naturaleza multidimensional de los comportamientos energéticos (Lopes et al., 2015).

3. Marco Teórico

3.1 Visión sistémica holística de la energía

La conceptualización de la energía ha evolucionado a través de diferentes paradigmas a lo largo de la historia. Inicialmente, las teorías antiguas y medievales de la energía se desarrollaron en el marco del enfoque esencialista, que veía la energía como movimiento y un potencial para que las cosas se movieran (Makarov, 2022). A medida que la humanidad se desarrollaba, la energía se convirtió en un factor crucial en su dominio sobre la Tierra, lo que llevó al surgimiento del paradigma del libre mercado en las décadas de 1980 y 1990, donde la energía quedó sujeta a la provisión privada (Hewitt, 2022b). No obstante, este paradigma ha sido criticado por promover actitudes instrumentales y antropocéntricas hacia el uso de energía y la naturaleza (Frigo, 2017). Más recientemente, se ha dado un giro hacia una nueva era de intervencionismo, donde la sustentabilidad y la pobreza energética se han sumado al enfoque tradicional de la seguridad del suministro (Coelho, 2014). En general, la conceptualización de la energía ha evolucionado desde una visión estática y esencialista a una comprensión más compleja y multifacética que considera factores sociales, económicos y ambientales.

El propósito de sistematizar un fenómeno energético es identificar patrones, relaciones y dependencias dentro del sistema, las cuales luego pueden ser utilizadas para optimizar y mejorar la generación, distribución y consumo de energía. También ayuda a identificar posibles problemas o ineficiencias dentro del sistema y a encontrar formas de abordarlos. La sistematización proporciona un marco para estudiar y modelar sistemas energéticos complejos, lo que permite a los investigadores desarrollar modelos matemáticos y simulaciones que pueden ayudar en la toma de decisiones y la formulación de políticas (Gavrilova & Salov, 2019; Sundqvist et al., 1999; Wellstead & Cloutier, 2011).

Los sistemas energéticos y su dinámica interna pueden entenderse a través de una visión sistémica, que considera la interrelación de los subsistemas y enfatiza la importancia de estudiar el sistema en su conjunto (Gavrilova & Salov, 2020). Este enfoque contrasta con el reduccionismo, que se centra en estudiar partes individuales por separado y luego combinarlas en un todo (Koskinen, 2013). Al adoptar una visión sistémica, queda claro que el comportamiento de los sistemas energéticos es el resultado de interacciones dinámicas entre sus componentes constituyentes (Cavallaro et al., 2014). Esta comprensión es crucial para la gestión eficaz de los sistemas energéticos de manera sostenible (Selva, 2010). Sin embargo, los esfuerzos anteriores en investigación y políticas a menudo han pasado por alto las interconexiones entre los componentes, como en el caso del sector energético (Laimon et al., 2022). Para abordar los desafíos de sustentabilidad, es necesario utilizar el pensamiento sistémico y considerar la dinámica subyacente de las interacciones de componentes. Al hacerlo, se pueden implementar soluciones a largo plazo, evitando soluciones a corto plazo que puedan socavar la sustentabilidad.

3.2 Sistemas dinámicos multidominio

Los sistemas multidominio también conocidos como sistemas multifísicos se describen como aquellos sistemas que integran componentes de múltiples dominios energéticos. Como tal, este concepto describe casi cualquier tipo de sistema capaz de utilizar la potencia suministrada por una fuente de inyección de potencia, para impulsar y manifestar un fenómeno particular que implique la transformación y/o disipación de una o más formas de energía (térmica, eléctrica, mecánica, hidráulica, etc.). Este trabajo toma como objeto de estudio a los sistemas de múltiples dominios energéticos, específicamente aquellos sistemas que inciden directamente en las actividades locales de los seres humanos (ej. motor eléctrico, bomba de presión, refrigeradores, etc.).

El acoplamiento de diferentes formas de energía en estos sistemas plantea desafíos para sus operaciones seguras y una regulación efectiva. Se han hecho esfuerzos para desarrollar métodos de simulación dinámica eficientes y fáciles de usar para sistemas multi-energéticos. Los investigadores han propuesto modelos y algoritmos para simular la dinámica multidominio como es el caso de la energía eléctrica fusionada y los sistemas termofluidos, permitiendo la representación explícita de efectos transitorios e interacciones dinámicas entre diferentes dominios de energía (Zhang et al., 2023). Estos avances en las técnicas de modelado y simulación han facilitado el análisis y la comprensión de sistemas dinámicos que involucran múltiples dominios de energía (“Hybrid Physics and Data-Driven Method for Modeling and Analysis of Electricity–Heat Integrated Energy Systems,” 2023).

Los sistemas multidominio por su naturaleza multidisciplinar son complejos, no lineales, fuertemente acoplados, multivariados y se encuentran usualmente en el entorno industrial. Una forma de representar el comportamiento de un sistema energético multidominio es a partir de la interacción entre subsistemas de distintas disciplinas de la ingeniería (ver Figura 1), por lo que también se considera a estos sistemas como sistemas multidisciplinarios o multifísicos.

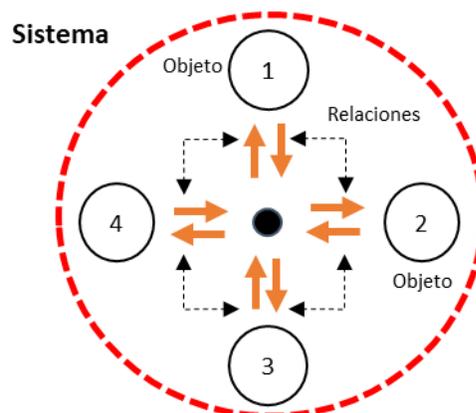


Figura 1: Representación básica de un sistema como conjunto de relaciones entre objetos.

Los objetos que integran un sistema se clasifican en varias categorías, en primera instancia un objeto estimulador, excitador o impulsador y en correspondencia un objeto a

estimular/excitar o impulsar, cuya expresión final comportamental determinará su naturaleza. Adicional se consideran los sensores y actuadores. Los sensores son los elementos que reciben información y los actuadores son los elementos que producen reacciones reales en el sistema.

Mediante el uso de estos objetos, Quastler demostró una estructura común entre sistemas a partir de las siguientes leyes (Lin, 1999):

1. Las interacciones son entre sistemas y entre los sistemas y sus entornos.
2. La eficiencia de un sistema es estimulada por sus movimientos internos y la captación de información sobre su entorno (ver Figura 2).

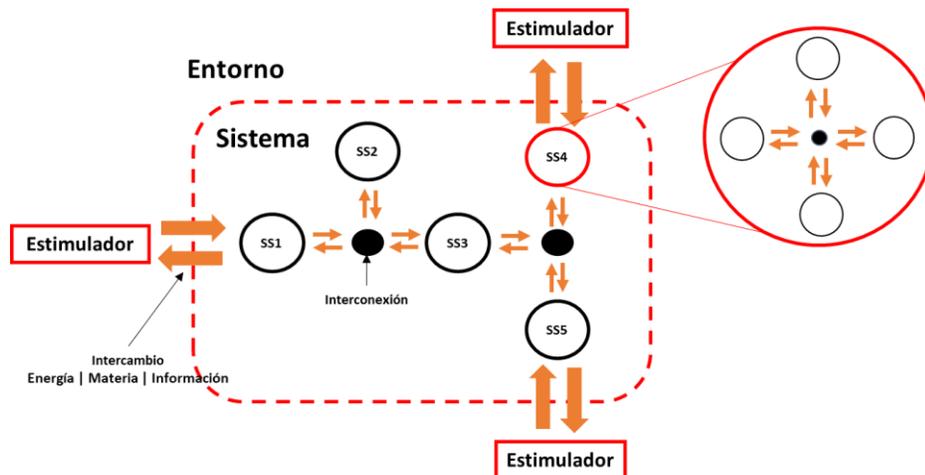


Figura 2: Representación general de la estructura de un sistema como la interacción mutua entre subsistemas bajo influencia del entorno y estímulos externos.

La sistematización de los sistemas de múltiples dominios energéticos permite representar características fundamentales de este mundo por su estructura organizacional y sus conexiones que relacionan interna y externamente a las distintas expresiones energéticas. Por esto, en la medida que la raza humana avanza, estudiar los problemas con multicausalidad o multirelación será cada vez más y más importante (Lin, 1999).

Un sistema de este tipo posee tres características importantes: 1) órdenes o niveles; 2) estructura de conjunto donde cada sistema se define como mínimo a partir de dos subsistemas; 3) relatividad e integralidad; es decir, la existencia de los subsistemas es relativas y dependientes entre ellas y se condicionan mutuamente (Lin, 1999).

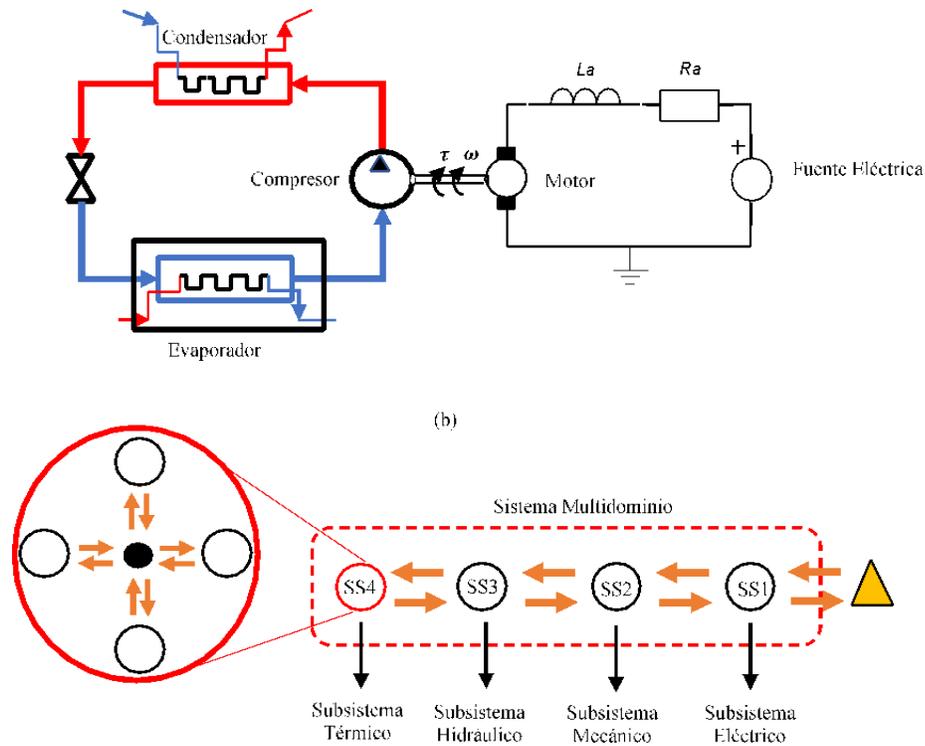


Figura 3: Representación de un Sistema energético multidominio para un sistema de refrigeración por compresión de vapor.

A medida que crecía la complejidad de los sistemas creados por el hombre, se hizo evidente que había muchos problemas importantes que no podían estar relacionados con una disciplina de ingeniería específica, sino que requerían una visión holística (ver Figura 3). Se volvió esencial considerar la interacción de las partes que forman un sistema en lugar de las partes en sí mismas (Åström et al., 2012).

3.3 Modelado de sistemas multidominio

Para lograr su objetivo, los ingenieros crean y analizan una representación simplificada y abstracta de un sistema, conocida como modelo del sistema. Según esta definición, el modelo nunca será una representación exacta del sistema y el comportamiento proyectado siempre será una aproximación. No obstante, se pueden construir modelos notablemente precisos.

A continuación, se describen algunos paradigmas comunes para la representación de sistemas dinámicos multidominio.

3.3.1 Paradigmas de modelado para un sistema dinámico multidominio

3.3.1.1 Representación por función de transferencia

Las funciones de transferencia son herramientas matemáticas utilizadas para describir la relación entre la entrada y la salida de un sistema dinámico. Se utilizan comúnmente en modelar y analizar diversos tipos de sistemas, como dispositivos electrónicos de potencia, sistemas de control y objetos de control estocástico. Las funciones de transferencia pueden derivarse de modelos de variables de estado, y permiten a los investigadores estudiar el comportamiento y la estabilidad de los sistemas dinámicos. Ejemplos de uso de funciones de transferencia incluyen determinar los parámetros de modelos de circuitos eléctricos, diseñar sistemas de control y construir observadores o filtros óptimos para objetos de control estocástico. Las herramientas de simulación Simulink MATLAB y Control Systems Toolbox se utilizan a menudo junto con funciones de transferencia para el diseño y análisis de sistemas (Lobontiu, 2018; Neil A. Duffie, 2022; Vinatier, 2022).

La utilización de funciones de transferencia para modelar sistemas dinámicos de múltiples dominios energéticos presenta desafíos significativos para representar con precisión sistemas complejos con interconexiones entre diferentes dominios de energía. Es más eficaz para sistemas lineales, pero puede resultar en la pérdida de información sobre comportamientos no lineales (Koshti, 2023). La linealización es a menudo necesaria pero solo es válida en entornos con pequeñas variaciones (S. Han et al., 2023). El desarrollo de funciones de transferencia para sistemas complejos puede llegar a ser complicado, requiriendo funciones complejas o simplificando supuestos que pueden afectar la precisión del modelo (Crespo & Coutinho, 2022). Otro punto relevante parte de relacionar las interconexiones entre diferentes dominios energéticos, el desarrollo de funciones de transferencia puede volverse complicado, con la necesidad de funciones adicionales o asunciones simplificadoras que afectan la precisión del modelo.

3.3.1.2 Representación por espacio de estados

El modelado del espacio de estados es un enfoque ampliamente utilizado para modelar y analizar la dinámica de los sistemas dinámicos. Implica representar el sistema utilizando variables de estado, que son el conjunto mínimo de variables que describen completamente el estado del sistema. Las ecuaciones de estado son un conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden que describen la evolución de las variables de estado a lo largo del tiempo. El modelo de espacio de estados se puede utilizar para determinar diversas propiedades del sistema, como controlabilidad y observabilidad, y se puede convertir en un modelo de función de transferencia. Este tipo de modelado permite la representación de sistemas causales y propios, donde el número de ceros no excede el número de polos. Esto significa que la entrada, salida y estado del sistema no se pueden seleccionar libremente, lo que limita la flexibilidad en la construcción de modelos. Para abordar esta limitación, se ha propuesto una extensión denominada modelado de espacio de estado descriptor. Los modelos de espacio de estado

descriptor pueden representar sistemas adecuados e inadecuados y permitir una construcción modular de modelos de sistemas de energía con elección flexible de puertos de subsistema (Blenk & Weindl, 2023).

3.3.1.3 Representación por ecuaciones diferenciales

La representación de sistemas dinámicos utilizando ecuaciones diferenciales es un enfoque común en diversos campos. Las ecuaciones diferenciales describen el comportamiento de un sistema a lo largo del tiempo relacionando las tasas de cambio de variables. Este enfoque resulta altamente relevante para la descripción del sistema manteniendo correspondencia física real del mismo. Modelar sistemas con múltiples dominios de energía utilizando ecuaciones diferenciales es esencial para capturar el comportamiento interconectado de sistemas energéticos complejos.

3.3.2 Modelado con base en energía

El modelado basado en energía es particularmente valioso en la ingeniería al involucrar componentes físicos y flujos de energía significativos, como sistemas eléctricos, mecánicos y térmicos. Estas técnicas permiten una comprensión más profunda de las interacciones energéticas en un sistema y son esenciales para diseñar sistemas más eficientes y sostenibles.

Tradicionalmente bajo el enfoque monodisciplinar se construye un modelo para cada dominio físico de forma independiente y luego los submodelos se ensamblan en un nivel numérico. Esto resulta, por ejemplo, en una representación de diagrama de bloques del sistema como se muestra en la Figura 4. Este procedimiento también conduce a un modelo global, pero no se basa exclusivamente en teorías unificadas (L. L. Sass, 2004).

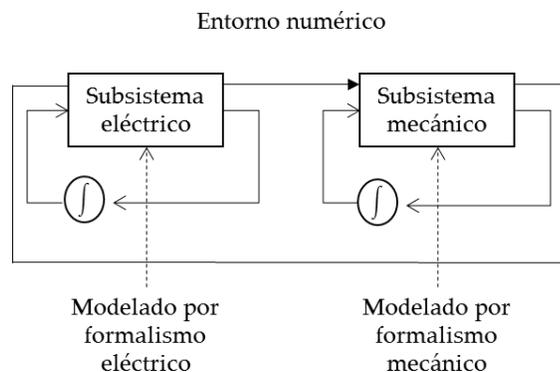


Figura 4: Conjunto de diagrama de bloques de submodelos en un entorno numérico.

La aplicación de cada representación se limita al diseño y análisis especializado de cada subsistema por lo que un diseño óptimo de varios subsistemas no conducirá necesariamente a un diseño óptimo del sistema total (L. L. Sass, 2004). Esto requiere un cambio de enfoque en el proceso tradicional de modelado.

multidominio basados en teorías unificadas que facilitan la obtención de modelos. Algunos autores identifican a los programas "generadores de modelos" como la única forma de obtener modelos para aplicaciones industriales realistas (L. L. Sass, 2004) lo que será fundamental para la comprensión del proceso y la simulación.

Estas teorías se basan en analogías entre los diferentes campos de la física y se utilizan para obtener un modelo global de todo el sistema. Otra manera unificada de abordar estos sistemas es mediante un lenguaje común (la energía o la potencia) que aborde integralmente los componentes de distintos dominios energéticos.

Las estrategias basadas en teorías unificadas tienen la ventaja que, mediante un modelo global, todos los componentes del sistema indistintamente de su dominio energético se representan de la misma manera; además, las ecuaciones de los diferentes dominios se acoplan y se resuelven al mismo tiempo, lo que es propicio para algunos problemas que requieren soluciones integrales. A continuación, profundizaremos en técnicas basadas en el modelado unificado para sistemas multidominio.

Técnicas comunes de modelado unificado para sistemas multidominio

Hay dos líneas principales de teorías unificadas para el modelado de sistemas multidominio:

1. **Representación gráfica:** Basado en las analogías entre los dominios energéticos. Las teorías gráficas, también llamadas teorías del sistema, representan el sistema como un conjunto de componentes interconectados.
2. **Representación matemática** comienzan directamente a partir de las leyes fundamentales que describen la dinámica del sistema y se basan en principios de conservación de la energía.

A continuación, se hace una breve descripción de las técnicas más comunes en modelado unificado:

- a) **Bond graph:** el método se basa en el intercambio y preservación de la energía entre elementos y subsistemas, y permite representar con una mínima cantidad de símbolos los diferentes elementos del sistema y sus interacciones energéticas como también las relaciones de causa-efecto. Este se desarrolla mediante el uso de grafos de potencia los cuales representan cómo fluye la energía a través de los componentes del sistema indistintamente del dominio energético (Borutzky, 2011).
- b) **Linear graph:** La teoría de grafos lineal es una rama de las matemáticas dedicada al estudio de la topología de sistemas. Fue inventado por Leonhard Euler en el siglo XVIII para estudiar problemas de conectividad y se extendió en la década de 1900 al modelado de sistemas físicos. En esta extensión, la teoría de grafos lineal se combina con las características de los componentes físicos para obtener una teoría de sistemas unificados. En pocas palabras, se obtiene un modelo del sistema combinando relaciones topológicas de la teoría de grafos lineal con las ecuaciones constitutivas para

componentes individuales. Para modelar un sistema físico, se identifican componentes individuales y se determinan sus ecuaciones constitutivas. Una vez que se determinan las ecuaciones constitutivas, los modelos componentes se combinan en la topología definida por la estructura del sistema físico (L. Sass et al., 2004).

- c) **Principio planta virtual:** se desarrolló por primera vez en mecánica y varios investigadores extendieron esta técnica a los sistemas eléctricos. Ofrece un marco teórico unificado riguroso para el modelado de sistemas multidominio y conduce a un conjunto mínimo de ecuaciones, especialmente cuando se expresa bajo la forma de Lagrange (L. Sass et al., 2004). Todos estos formalismos consideran cargas o flujos como variables generalizadas, que no son variables convencionales en teoría de circuitos, que clásicamente consideran corrientes y voltajes.
- d) **Formalismo hamiltoniano:** Para el enfoque por puertos de sistemas hamiltonianos o sistemas hamiltonianos controlados por puerto (PCHS) la energía juega un papel fundamental, las variables portuarias son variables conjugadas de modo que su producto tiene una dimensión de potencia, y la interconexión de subsistemas se implementa mediante lo que se denomina una estructura Dirac, que impone la preservación de la potencia. Este método permite el acoplamiento de sistemas de diferentes dominios utilizando energía como concepto de enlace, y proporciona la base matemática para el modelado de gráficos de enlace (BG). Además de describir los sistemas de una manera modular, escalable y no específica del dominio, la teoría de PCHS permite una implementación natural de los métodos de control basados en la pasividad que utilizan la energía como función de almacenamiento (Batlle & Doria-Cerezo, 2006).

A excepción de Bond Graph, que se aplica indistintamente a todos los dominios energéticos y sus combinaciones, las demás técnicas solo han sido exitosas en problemas electromecánicos.

3.3.2.1 Modelado unificado basado en energía por gráfico de enlace (bond graph)

Un sistema energético multidominio en ingeniería está compuesto por elementos que interactúan entre sí, intercambiando energía e información, determinando así la dinámica del sistema. La energía (o flujo de potencia) es la cantidad fundamental que se intercambia entre los elementos de un sistema. La potencia se define como el producto de dos factores: esfuerzo y flujo. La energía potencial establece la variable de esfuerzo en el sistema, mientras que la energía cinética establece la variable de flujo. En la mecánica traslacional, la potencia es el producto de la fuerza y la velocidad; en el sistema eléctrico, la potencia es producto del voltaje y la corriente; en los sistemas hidráulicos, la potencia es el producto de la presión y el caudal volumétrico; en el dominio magnético, la potencia es el producto de la fuerza magnetomotriz (mmf) y la tasa de flujo; y en el dominio térmico el producto de la temperatura y el flujo entrópico dan la potencia. Así, en cualquier sistema, sea mecánico, eléctrico, acústico, químico, hidráulico o térmico, podemos definir una variable de esfuerzo generalizada, $e(t)$, y una

variable de flujo generalizada, $f(t)$, cuyo producto entrega la potencia intercambiada entre los elementos, ver ecuación (1).

$$P(t) = e(t) * f(t) \quad (1)$$

En la representación BG, el intercambio de energía o el flujo de potencia entre elementos está representado por enlaces. A través de este vínculo, un elemento intercambia esfuerzo y flujo con el resto del sistema. Por su naturaleza gráfica de visualizar el intercambio de energía en un sistema, que incluye almacenamiento, disipación y transformación, la metodología Bond Graph permite el modelado integrado del comportamiento independientemente de la naturaleza física del sistema estudiado. BG también se puede utilizar para análisis estructural y causal, que son esenciales para diseñar sistemas de control y monitoreo que permitan el desarrollo de sistemas robustos en detección de fallas; en (Sellami et al., 2018) y (Ghiaus, 1999) se destaca la ventaja de diagnosticar una falla sin conocimiento previo de posibles fallas en los dispositivos de generación de refrigeración por compresión de vapor. Un modelo Bond Graph se puede refinar agregando gráficamente más elementos, como pérdidas térmicas o efectos de inercia y almacenamiento. Más significativamente, desde el punto de vista de la simulación, las propiedades causales del lenguaje de gráficos de potencia permiten al modelador resolver a nivel algorítmico el modelado en la etapa de formulación, incluso antes de que se hayan derivado las ecuaciones detalladas. El uso de una notación gráfica independiente del dominio, para capturar la distribución y el flujo de potencia/energía dentro de un sistema dinámico (Kypuros, 2013), revela las analogías entre dominios más que como simples ecuaciones que son análogas, como conceptos físicos aplicados que son análogos (Broenink, 1999), (ver Tabla 1). Por lo tanto, el modelado BG puede considerarse como una herramienta asistida por computadora integrada en el campo de la ingeniería y un método de modelado matemático de sistemas complejos.

Tabla 1: Variables de potencia generalizadas, analogía para cada dominio de energía.

Dominio Energético	Variables de Potencia	
Generalizado	Esfuerzo Generalizado	Flujo Generalizado
Eléctrico	Voltaje (u) [V]	Tasa de Mov. de Carga (\dot{q}) [A]
Mecánica Traslacional	Fuerza (F) [N]	Tasa de Mov. Traslacional (\dot{x}) [m/s]
Mecánica Rotacional	Torque (τ) [N.m]	Tasa de Mov. Angular ($\dot{\theta}$) [Rad/s]
Hidráulico	Presión (P)	Tasa de Mov. Volumétrico (V)

	[Pa]	[m^3/s]
Térmico	Temperatura (T) [°C]	Tasa de Mov. Entrópico (S) [J/ (K.s)]
Transformación Química	Potencial Químico (μ) [J/Mol]	Tasa de Mov. Molar (ξ) [Mol/s]
Química Cinética	Afinidad Química (A) [J/Mol]	Tasa de Reacción (\dot{n}) [Mol/s]
Economía	Precio Unitario (Pu) [\$/unidad]	Tasa de Mov. de Ordenes ($f\dot{c}$) [Unidad/Periodo]

Enlaces y puertos

La conexión entre dos elementos o dos submodelos se denomina enlace de potencia o gráfico de enlace; se dibuja como una sola línea (ver Figura 6). Este vínculo denota un flujo de energía ideal entre los dos submodelos conectados. La energía que ingresa al enlace en un extremo abandona inmediatamente el enlace en el otro extremo (continuidad de la energía).

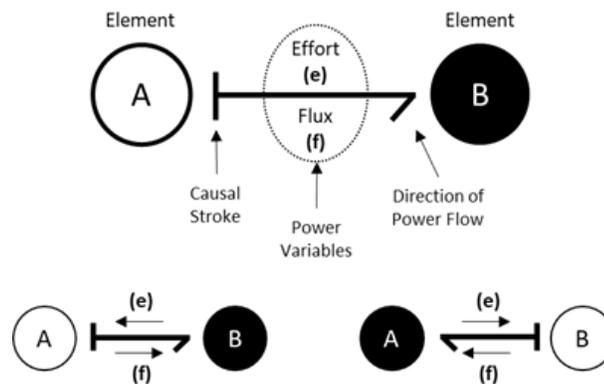


Figura 6: Representación de la información mediante la técnica de modelado BG y asignación causal.

El flujo de energía a lo largo de un enlace tiene la dimensión física de potencia, producto de dos variables: esfuerzo y flujo. En cada dominio físico, existe tal combinación de variables. Estos pares de variables se denominan variables conjugadas y si en un extremo entra esfuerzo, en el otro extremo sale el flujo en sentido contrario y viceversa. Para entender la conexión que establece un vínculo, este vínculo se puede interpretar de dos formas diferentes, a saber:

1. **Como interacción energética:** los subsistemas conectados forman una carga entre sí a través de su intercambio de energía. Un enlace de potencia representa una conexión en la que se intercambia una cantidad física.

2. **Como un flujo de señales bilateral:** la conexión se interpreta como dos señales, un esfuerzo y un flujo, fluyendo en sentido contrario entre sí, determinando así la dirección computacional de las variables del enlace. Con respecto a uno de los submodelos conectados, el esfuerzo es la entrada y el flujo la salida, mientras que, para el otro submodelo, la entrada y la salida están, por supuesto, determinadas por el flujo y el esfuerzo, respectivamente.

Estas dos formas de concebir un vínculo son esenciales en el modelado de gráficos de enlaces. El modelado comienza indicando la estructura física (topología) del sistema. Los enlaces se interpretan primero como interacciones de energía, y luego a los enlaces se les da una dirección computacional, interpretando los enlaces como flujos de señales bilaterales. Durante el modelado, aún no es necesario decidir cuál es la dirección computacional de las variables. La determinación de la dirección computacional durante el modelado restringe la reutilización del submodelo. Sin embargo, es necesario derivar el modelo matemático (conjunto de ecuaciones diferenciales) del gráfico. El proceso de determinar la dirección computacional de las variables de enlace se denomina análisis causal. El resultado se indica en el gráfico mediante la denominada traza causal, que indica la dirección del esfuerzo, y se denomina causalidad de vínculo. Las analogías entre diferentes sistemas se muestran en la Tabla 2. Así, desde una base unificada, diferentes sistemas pueden ser representados por el mismo conjunto de ecuaciones diferenciales. Estas analogías tienen una base física: los conceptos físicos subyacentes son análogos y, en consecuencia, las ecuaciones diferenciales resultantes son análogos. Los conceptos físicos se basan en la energía y el intercambio de energía.

Tabla 2: Variables energéticas generalizadas, analogía para cada dominio energético.

Dominio Energético	Variables Energéticas	
Generalizado	Momento Generalizado	Desplazamiento Generalizado
Eléctrico	Acoplamiento Mag. (λ) [Vs]	Carga eléctrica (q) [C]
Mecánica Traslacional	Momento Inercial (p) [N.s]	Desplazamiento Tras. (x) [m]
Mecánica Rotacional	Momento Angular (L) [N.m.s]	Desplazamiento Ang. (θ) [Rad]
Hidráulico	Momento Hidráulico (ph) [Pa. s]	Desplazamiento Volumétrico (V) [m ³]

Térmico	-	-
Transformación Química	-	-
Economía	Momento Económico (pe)	Tasa Flujo de Ordenes (qe)

En la representación de sistemas dinámicos, las variables de energía se asocian con variables de estado. Se utilizan dos tipos de variables de energía: momento generalizado $p(t)$ y desplazamiento generalizado $q(t)$. Estos se obtienen integrando las variables de potencia con respecto al tiempo, como se puede ver en las ecuaciones (2) y (3).

$$p(t) = \int_{-\infty}^t e(r)dr = p_0 + \int_{t_0}^t e(r)dr \quad (2)$$

$$q(t) = \int_{-\infty}^t f(r)dr = q_0 + \int_{t_0}^t f(r)dr \quad (3)$$

Reescrito en forma diferencial, tenemos las ecuaciones (4) y (5).

$$\frac{dp(t)}{dt} = e(r) \quad (4)$$

$$\frac{dq(t)}{dt} = f(r) \quad (5)$$

El comportamiento con respecto a la energía es independiente del dominio. Es lo mismo en todas las disciplinas de la ingeniería, como se puede concluir comparando un circuito RLC con un sistema de resorte-masa-amortiguador. Esto conduce a gráficos de enlaces idénticos, como se verá más adelante.

Elementos

Los elementos básicos del gráfico de bonos se pueden clasificar y representar matemáticamente en función de cómo utilizan, almacenan y convierten la energía. Los elementos para modelar sistemas multidominio a través de BG son fuentes de energía, elementos de almacenamiento, elementos disipativos y conservadores de potencia (uniones de interconexión y cambiadores de escala o dominio), ver Figura 7.

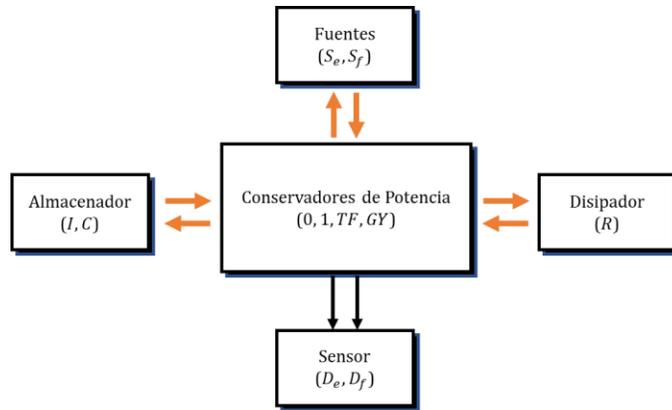


Figura 7: Elementos Bond Graph.

Fuentes de energía: Hay dos elementos básicos de 1 puerto: la fuente de esfuerzo y la fuente de flujo. Se utilizan para representaciones idealizadas de elementos como fuentes de tensión o corriente, fuerzas externas, fuentes de presión, etc. (ver Figura 8). Como sugieren los nombres, una fuente de esfuerzo especifica un esfuerzo en el sistema (la presencia de energía potencial) y una fuente de flujo especifica un flujo en el sistema (la presencia de energía cinética).

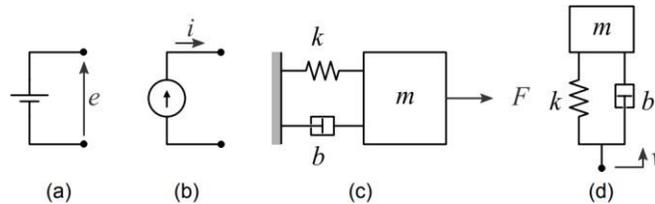


Figura 8: Ejemplos de fuentes de esfuerzo y flujo que incluyen (a) una fuente de voltaje, (b) una fuente de corriente, (c) una entrada de fuerza externa y (d) una entrada de velocidad externa.

Elementos de almacenamiento de energía: Hay dos tipos de elementos de almacenamiento: capacitancia generalizada o elementos C, inductancia generalizada o elementos I. Las variables generalizadas de desplazamiento (q) y momento (p) son las variables de estado del sistema debido a un proceso de acumulación (o integración). Los elementos C son elementos básicos que almacenan energía potencial (ver Figura 9). Se caracterizan por una relación constitutiva que relaciona directamente el esfuerzo con el desplazamiento generalizado, ecuación (6). Si el elemento es lineal, la capacitancia generalizada, C, está definida por la ecuación (7).

$$q = \Phi_C(e) \quad (6)$$

$$C = \frac{q}{e} \quad (7)$$

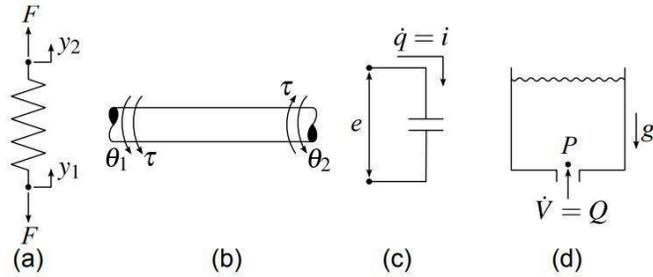


Figura 9: Ejemplos de elementos C: (a) un resorte, (b) un eje de torsión, (c) un capacitor eléctrico y (d) un acumulador hidráulico.

Los elementos I son elementos básicos que almacenan energía cinética (ver Figura 10). Se caracterizan por una relación constitutiva que relaciona directamente el impulso con el flujo, Ecuación (8). Si el elemento I se modela mediante una relación constitutiva lineal, la inercia generalizada I se define como la Ecuación (9):

$$p = \Phi_I(f) \quad (8)$$

$$I = \frac{p}{f} \quad (9)$$

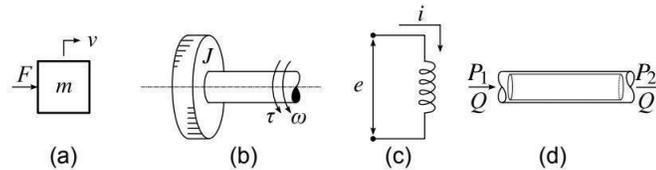


Figura 10: Ejemplos de elementos I: (a) una masa, (b) una inercia de torsión, (c) un inductor eléctrico y (d) una inercia hidráulica.

Elementos disipativos: En general, para elementos resistivos, R, con una relación constitutiva lineal, la resistencia generalizada del elemento, R, se define como en la Ecuación (10). Ver Figura 11.

$$R = \frac{e}{f} \quad (10)$$

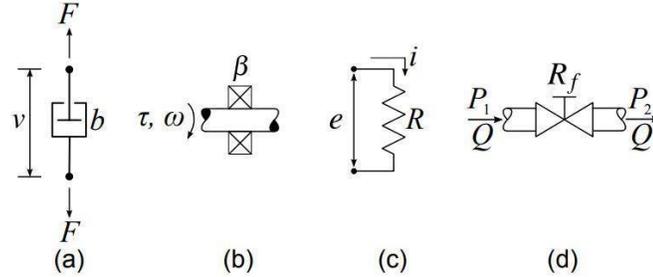


Figura 11: Ejemplos de elementos R de puerto único que incluyen (a) un amortiguador mecánico, (b) un cojinete de rodillos, (c) una resistencia eléctrica y (d) una válvula hidráulica.

Transformadores y Giradores: Los transformadores ideales, TF, se caracterizan por una relación constitutiva que relaciona directamente el esfuerzo en el primer puerto (e_1), con el esfuerzo en el segundo puerto (e_2), y el flujo en el segundo puerto (f_2), con el flujo en el primer puerto (f_1). Las relaciones constitutivas de un transformador lineal ideal se encuentran en las ecuaciones (11) y (12). Donde n se llama módulo del transformador e indica la relación proporcional entre el esfuerzo y los flujos en cada lado. Ejemplos de transformadores para los diferentes dominios en la Figura 12.

$$e_1 = n \cdot e_2 \quad (11)$$

$$f_2 = n \cdot f_1 \quad (12)$$

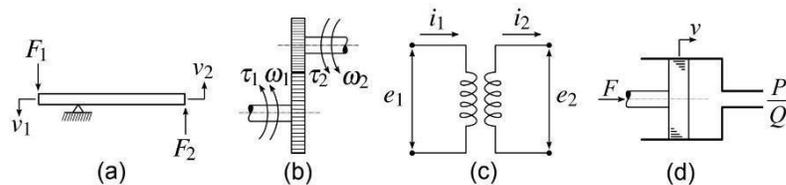


Figura 12: Ejemplos de elementos TF que incluyen (a) una palanca rígida, (b) un par de engranajes, (c) un transformador eléctrico y (d) un pistón hidráulico.

El segundo elemento de dos puertos es el Girador, GY. Como el transformador, el girador transmite energía (ver Figura 13). Sin embargo, la relación directa es entre el esfuerzo de un lado y el flujo del otro lado. Las relaciones constitutivas de un girador lineal ideal se encuentran en las ecuaciones (13) y (14).

$$e_1 = r \cdot f_2 \quad (13)$$

$$e_2 = r \cdot f_1 \quad (14)$$

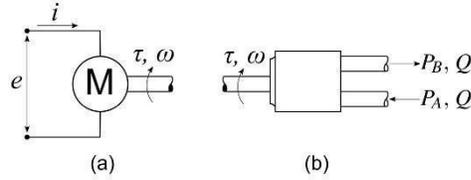


Figura 13: Ejemplos de elementos GY que incluyen (a) un motor eléctrico ideal y (b) una bomba centrífuga ideal.

Uniones: Las uniones se utilizan para interconectar los elementos básicos ya introducidos. Sirven para representar la interacción de las relaciones constitutivas asociadas con los elementos de 1 y 2 puertos. Al igual que con los elementos básicos de 2 puertos, las uniones conservan energía. Las uniones, en general, pueden tener muchos puertos conectados (es decir, dos o más puertos). Debido a que la energía se conserva en una unión, la energía que entra debe ser igual a la energía que sale, ecuaciones (15) y (16).

$$P_{in} = P_{out} \quad (15)$$

Que pueden ser reescritas como:

$$P_{in} - P_{out} = 0 \quad (16)$$

Para una unión con $j = 1, 2, 3, \dots, n$ puertos, esta expresión generalmente se puede escribir como Ecuación (17):

$$\sum_{j=1}^n P_j = \sum_{j=1}^n e_j \cdot f_j = 0 \quad (17)$$

Para una unión -0-, de esfuerzo común, la condición principal dicta la Ecuación (18).

$$e_1 = e_2 = \dots = e_n \quad (18)$$

La suma de los flujos para una unión -0- surge de sustituir la Ecuación (17) en la ecuación (18), lo que da como resultado la expresión (19).

$$\sum_{j=1}^n P_j = \sum_{j=1}^n e_j \cdot f_j = e_j \sum_{j=1}^n f_j = 0 \Rightarrow \sum_{j=1}^n f_j = 0 \quad (19)$$

Para un flujo común, unión -1-, la condición principal dicta la Ecuación (20):

$$f_1 = f_2 = \dots = f_n \quad (20)$$

La suma de los esfuerzos para una unión -1- surge de sustituir la Ecuación (17) en la ecuación (20), lo que da como resultado la expresión (21).

$$\sum_{j=1}^n P_j = \sum_{j=1}^n e_j \cdot f_j = f_j \sum_{j=1}^n e_j = 0 \Rightarrow \sum_{j=1}^n e_j = 0 \quad (21)$$

3.4 Intervención en la dinámica interna de sistemas de múltiples dominios energéticos con correspondencia física real

La dinámica del comportamiento de un sistema se puede entender analizando la evolución de las variables observadas a lo largo del tiempo. Para comprender este comportamiento en la cotidianidad, se realizan experimentos intencionales directamente sobre el problema que se está estudiando sin perder noción concreta de las oportunidades y condicionantes que estos puedan tener. Partir de una correspondencia física real implica realizar experimentos directos sobre un sistema para comprender su comportamiento, analizando la evolución de las variables a lo largo del tiempo y recopilando datos de entrada y salida.

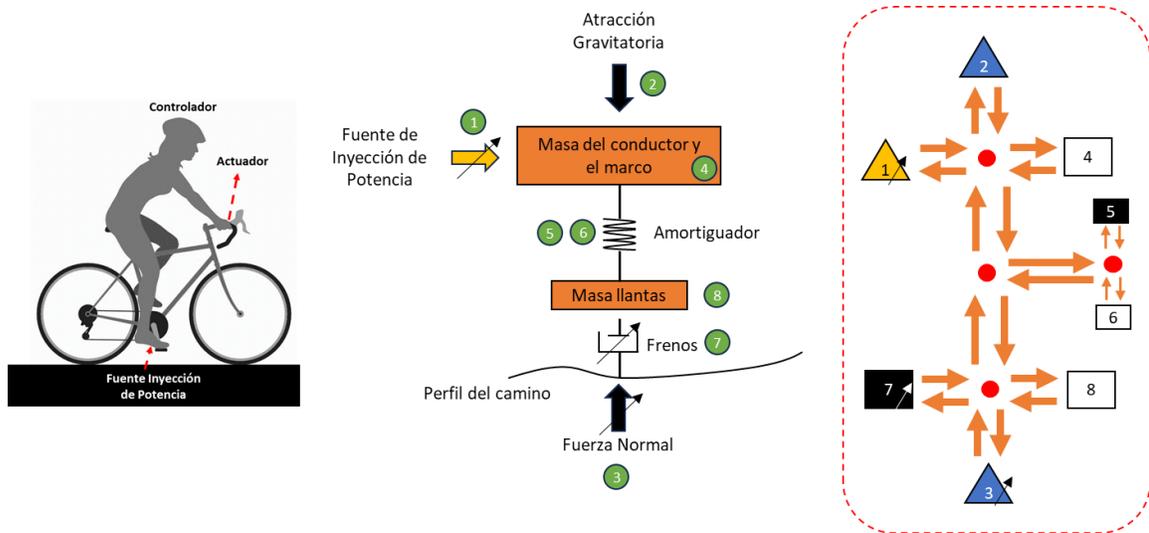


Figura 14. Ejemplo ilustrativo de un sistema energético multidominio con correspondencia física.

La importancia de representar un sistema energético multidominio mediante una correspondencia física real de sus dinámicas internas radica en:

- **Comprensión integral del sistema:** Al representar fielmente las dinámicas internas de un sistema energético multidominio, se obtiene una comprensión más completa de cómo interactúan y se relacionan entre sí los diferentes componentes y procesos. Esto es fundamental para identificar y evaluar cambios en las dinámicas comportamentales como resultado de su intervención para reducción del consumo de energía.

- **Diseño de estrategias de intervención:** Con un reconocimiento del fenómeno físico y la capacidad de representarlo, es posible diseñar estrategias de intervención específicas y adaptadas a las necesidades y características del sistema en cuestión, influenciado tanto interna como externamente. Estas estrategias pueden incluir la implementación de tecnologías más eficientes, la optimización de procesos, la mejora de la gestión de la demanda energética y otras medidas destinadas a reducir el consumo de energía.

3.4.1 La filosofía del enfoque comportamental para el control de sistemas abiertos e interconectados.

Inicialmente propuesto por Willems (Willems, 2007a), la teoría de los sistemas comportamentales considera un sistema dinámico como un conjunto de funciones asignadas desde un eje de tiempo a un espacio de señal, o más comúnmente conocidas como trayectorias. Este conjunto, llamado comportamiento, es el centro de un sistema dinámico (Yan et al., 2021a).

Como tal, la teoría ve un sistema dinámico desde el punto de vista de la teoría de conjuntos en la cual un conjunto está definido por sus elementos, *las trayectorias que son admisibles a través de un sistema dinámico definen el sistema*. El enfoque comportamental proporciona no solo un nuevo punto de vista fundamentalmente diferente del análisis basado en modelos, sino también una forma excelente de tratar las interconexiones (Willems, 1997). No distingue entre entrada y salida, sino que las trata como un conjunto único de variables para el sistema, y la interconexión de dos sistemas dinámicos es el intercambio de trayectorias entre los dos sistemas. Como resultado, el comportamiento interconectado es simplemente las trayectorias comunes entre los dos sistemas. Esto brinda una representación flexible y escalable de un sistema interconectado, en el que un subsistema adicional integrado es esencialmente un conjunto adicional de restricciones sobre el comportamiento existente. Con este punto de vista, el control puede verse como una interconexión y los controladores esencialmente restringen el conjunto de comportamientos que pueden ocurrir en los sistemas a controlar.

El enfoque comportamental de los sistemas abiertos e interconectados es un marco matemático para modelar y analizar sistemas dinámicos, a su vez también se le considera como un paradigma para el modelado de sistemas interconectados (Trentelman & Willems, 2003). Se centra en el comportamiento del sistema, que se define como el conjunto de posibles trayectorias del sistema (Willems, 2007b). Este enfoque implica el uso de variables latentes además de variables manifiestas en el modelo, Las variables manifiestas son observables y medibles directamente, representando manifestaciones externas del comportamiento. En contraste, las variables latentes son constructos subyacentes no directamente observables, inferidos a partir de las respuestas o comportamientos observables. Estas variables latentes representan aspectos internos que influyen en el comportamiento manifiesto (Fong et al., 2016). La metodología describe un proceso de desgarrar, zoom y vinculación que se utiliza para

modelar sistemas interconectados, proporcionando un procedimiento sistemático que es adecuado para la física de sistemas interconectados (Trentelman & Willems, 2003). Este enfoque tiene similitudes el modelado por gráfico de enlace (bond-graph) (Pillai et al., 1999; Yan et al., 2021b). Este marco une diversas representaciones y descripciones de sistemas dinámicos, formando una plataforma unificada de análisis y control.

El enfoque comportamental de los sistemas abiertos e interconectados implica modelar sistemas basados en su comportamiento, que es la recopilación de todas las trayectorias posibles del sistema. Este punto de vista del control, nació de la necesidad de proporcionar herramientas más efectivas y generales para el proceso de diseño de modelado y control de los sistemas físicos que aparecen en la ingeniería considerando sistemas que son:

- a) Dinámicos**
- b) Abiertos**
- c) Interconectados**
- d) Modulares**

La forma en que se modela un sistema relativamente complejo es dividiendo el sistema en subsistemas y luego acercándose a los subsistemas individuales. Por tanto, un modelo de un sistema físico se caracterizará por los siguientes elementos:

a. Módulos, que representan subsistemas.

Un módulo se caracteriza por su tipo, parametrización y valores de parámetros. Hemos elegido el tipo de módulo (que especifica un conjunto de comportamientos posibles), fijamos las variables físicas correspondientes a un conjunto ordenado de terminales. La parametrización se ocupa de mapear los parámetros inherentes del módulo a un comportamiento adecuado. Luego, cuando definimos un módulo de esta manera, en realidad obtenemos el comportamiento de las variables terminales de este módulo.

b. Terminales, los enlaces físicos entre subsistemas.

Un terminal se especifica por su tipo. El tipo impone un conjunto ordenado de variables terminales.

c. La arquitectura de interconexión, la disposición de los módulos y su interconexión.

consiste en un conjunto de pares de terminales (desordenados, disjuntos y con elementos distintos), si un par de terminales pertenece a tal conjunto, entonces decimos que los terminales están conectados. Naturalmente, los pares de terminales deben ser del mismo tipo (eléctricos, mecánicos, etc. Este caso se denomina adaptado). Cuando esto último no es posible, necesitamos un conector (que puede acoplar diferentes tipos de variables de terminal). El emparejamiento de terminales adaptados impone una ley de interconexión.

d. La asignación de variables manifiestas, las variables que queremos estudiar.

Nos damos cuenta de que el modelo (en esta etapa) contendrá, además de las variables manifiestas, variables latentes que surgen de la interconexión de submódulos o de su uso como variables auxiliares de modelado.

El enfoque comportamental se basa en las siguientes premisas:

1. Un modelo matemático es un subconjunto de un conjunto de posibilidades a priori.

Este subconjunto es el comportamiento del modelo. Para un sistema dinámico, el comportamiento consiste en las trayectorias temporales que el modelo declara posibles.

2. El comportamiento a menudo se da como un conjunto de soluciones de ecuaciones.

Las ecuaciones diferenciales y en diferencias son una forma efectiva, pero no única, de especificar el comportamiento de un sistema dinámico.

3. El comportamiento es el concepto central en el modelado.

La equivalencia de los modelos, las propiedades de los modelos, las representaciones de los modelos y la identificación del sistema deben referirse al comportamiento.

4. Tanto los modelos de primeros principios como los modelos de sistemas interconectados suelen contener variables latentes además de las variables manifiestas a las que apunta el modelo.

La eliminación de variables latentes compacta las ecuaciones de comportamiento. Para sistemas diferenciales lineales invariantes en el tiempo, es posible la eliminación completa de las variables latentes.

5. Los sistemas físicos no suelen estar dotados de un gráfico de flujo de señales.

Los modelos de entrada/salida de sistemas físicos son apropiados solo en algunas situaciones especiales.

6. Los sistemas interconectados se pueden modelar mediante dividir, hacer zoom y vincular.

La arquitectura de interconexión se puede formalizar como un grafo con hojas. Los nodos del grafo corresponden a los subsistemas, los bordes corresponden a las terminales conectadas y las hojas corresponden a las terminales mediante las cuales el sistema interconectado interactúa con su entorno. La interconexión de sistemas físicos significa compartir variables. La asignación de salida a entrada suele ser una forma innecesaria, inconveniente y limitante de ver las interconexiones físicas.

7. Los conceptos de la teoría de sistemas, como la controlabilidad y la observabilidad, son más simples de definir y más generales en el entorno conductual que en el espacio de estado.

La controlabilidad se convierte en una propiedad genuina de un sistema dinámico en lugar de solo una representación de estado.

8. Control significa restringir el comportamiento de una planta mediante la interconexión con un controlador.

El control por selección de entrada, es decir, control en lazo abierto, y por retroalimentación, es decir, control en lazo cerrado, son casos especiales.

9. Los sistemas diferenciales lineales invariantes en el tiempo (incluido el caso especial de los sistemas algebraicos diferenciales) tienen una correspondencia biunívoca con los submódulos $R[\xi]$.

Esta correspondencia proporciona la capacidad de traducir cada propiedad de un comportamiento diferencial lineal e invariable en el tiempo en una propiedad del submódulo asociado. Dado que estos submódulos $R[\xi]$ se generan de forma finita, se pueden utilizar algoritmos basados en álgebra informática para analizar las propiedades del sistema.

Control como interconexión

En el control del comportamiento, la planta se ve como un sistema con dos tipos de terminales, un primer conjunto de terminales para las variables a controlar y un segundo conjunto para las variables de control. Las variables de control son las variables que están disponibles para el controlador, como las salidas de los sensores y las entradas de los actuadores en el control inteligente, o las variables en los terminales donde se puede interconectar un controlador a la planta en el control pasivo. Las variables para controlar son variables tales como perturbaciones, puntos de referencia y señales de seguimiento que entran en las especificaciones de rendimiento del problema de control. La planta y el controlador se muestran por separado en (a). El controlador es un sistema que impone restricciones al comportamiento de las variables de control. Después de la interconexión en (b), la planta y el controlador comparten las variables en los terminales de control. De esta forma, las restricciones impuestas por el controlador sobre las variables de control se transmiten a las variables a controlar de la planta. La retroalimentación clásica de salida de sensor a entrada de actuador (c) es un caso especial, con las variables de control que consisten en entradas de actuador y salidas de sensor compartidas por la planta y el controlador.

Control comportamental desde la perspectiva del sistema energético

Un sistema energético multidominio se puede indicar como una red de elementos que tienen múltiples conexiones, y cada uno de ellos se caracteriza por una propiedad energética específica. La energía total del sistema puede variar debido a la energía que se intercambia con el medio ambiente, y la dinámica del sistema se produce como resultado de los flujos internos de energía que ocurren entre las diferentes partes del sistema completo.

Desde el punto de vista del enfoque comportamental, un controlador es otro sistema dinámico, en interconexión con la planta. Así como la planta, el controlador tiene sus propias condiciones de comportamiento, las que imponen restricciones directamente a través de las trayectorias admisibles.

Es por ello que la acción de un controlador desde la perspectiva del sistema puede entenderse en términos energéticos como otro sistema dinámico. Entonces, el problema de control se

puede reformular como encontrar un sistema dinámico y un patrón debido a la interconexión tal que la función de energía general tome la forma deseada (referencia). Así el problema de control puede ser reformulado como un problema energético. Esta es la perspectiva planteada en la propuesta descrita a continuación.

3.5 El proceso de aprendizaje de trayectorias de comportamiento

El concepto de inteligencia para el aprendizaje de trayectorias de comportamiento basado en la experimentación se refiere a la capacidad de un sistema para adquirir conocimiento y mejorar su desempeño a través de la interacción directa con su entorno mediante experimentación y experiencia. Este enfoque está estrechamente relacionado con el paradigma de la inteligencia artificial conocido como aprendizaje por refuerzo, donde un agente aprende a través de la retroalimentación que recibe del entorno en forma de recompensas o penalizaciones. Por otro lado, la inteligencia computacional para la búsqueda de soluciones aplicadas a la optimización y al ahorro de energía de sistemas dinámicos complejos se refiere al uso de técnicas computacionales avanzadas para encontrar soluciones eficientes y óptimas en entornos complejos y cambiantes. Esto implica la aplicación de algoritmos y métodos de optimización, como algoritmos evolutivos, algoritmos genéticos, estrategias evolutivas, entre otros, para buscar soluciones que minimicen el consumo de energía y maximicen la eficiencia de sistemas dinámicos.

La relación entre estos dos conceptos radica en el uso de la experimentación y la experiencia para guiar el proceso de búsqueda de soluciones óptimas en sistemas dinámicos. En lugar de depender únicamente de modelos teóricos o conocimiento a priori, los algoritmos de inteligencia computacional pueden aprender y adaptarse en tiempo real a partir de la interacción con el entorno, utilizando la retroalimentación recibida para ajustar y mejorar continuamente las soluciones propuestas.

En resumen, la combinación de inteligencia para el aprendizaje basado en la experimentación y la inteligencia computacional para la búsqueda de soluciones ofrece un enfoque poderoso y adaptable para abordar desafíos de optimización en sistemas dinámicos complejos con un enfoque en la eficiencia energética. La dinámica del comportamiento de un sistema se puede entender analizando la evolución de las variables observadas a lo largo del tiempo. Para comprender este comportamiento, se realiza un experimento intencional directamente sobre el problema que se está estudiando. Este experimento tiene un doble propósito: obtener conocimientos sobre la dinámica del sistema y recopilar medidas de sus variables de entrada y salida.

3.6 A modo de resumen

Las bases teóricas mencionadas en los apartados 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4 proveen los elementos para el desarrollo de la propuesta. Como se mencionó en los capítulos introductorios, la

conceptualización de la energía tiene un impacto directo en la comprensión de sus dinámicas y aplicaciones. Una perspectiva sistémica que considere la interrelación de los subsistemas y enfatice la importancia de estudiar el sistema en su conjunto es fundamental. Para lograr este propósito se parte con la visión sistémica holística en el **apartado 3.1**.

El enfoque sistémico holístico de los fenómenos energéticos considera el fenómeno energético como interacciones complejas producto de la interrelación entre diferentes sistemas y niveles de organización y no solamente como una entidad objetiva que existe en diversas formas y puede realizar diferentes tipos de trabajo. Este enfoque contrasta con el reduccionismo, que se centra en estudiar partes individuales por separado y luego combinarlas en un todo. Al adoptar una visión sistémica, queda claro que el comportamiento de los sistemas energéticos complejos es el resultado de interacciones dinámicas entre sus componentes constituyentes. Esta comprensión es crucial para la gestión eficaz de los sistemas energéticos de manera sostenible.

Algunas cualidades específicas de estas interacciones son:

- **Interconexión:** Como una red compleja de relaciones dinámicas entre diversos componentes y niveles de organización.
- **Acoplamiento:** Refiriéndose a la interdependencia resultante de la conexión o la relación entre diferentes sistemas energéticos, procesos o componentes.
- **Flujo de energía:** La energía no es estática, sino que fluye constantemente a través de los sistemas, desde las fuentes de energía hasta los receptores.
- **Transformación:** La energía se transforma de una forma a otra, siguiendo las leyes de la termodinámica. Por ejemplo, la energía solar se transforma en energía química a través de la fotosíntesis en las plantas, que a su vez se convierte en energía mecánica cuando los animales consumen esas plantas.
- **Eficiencia y pérdida:** En cualquier proceso de transformación de energía, siempre hay pérdidas de energía en forma de calor u otras formas no útiles. La eficiencia energética es un concepto importante en la gestión del recurso energético.

El **apartado 3.2**, profundiza en los sistemas energéticos de múltiples dominios, desde una visión integradora que acopla múltiples formas de energía (eléctrica, mecánica, hidráulica, térmica, etc.) que, como conjunto, establecen un comportamiento específico. El objetivo de abordar estos sistemas es mejorar el rendimiento general del sistema, la confiabilidad operativa y la eficiencia energética. Al expandir los límites del análisis tradicional del sistema para incluir la dinámica interna y el consumo de energía, se puede capturar el comportamiento interconectado de los sistemas energéticos complejos.

Finalmente, los **apartados 3.3, 3.4 y 3.5** enfatizan en las herramientas disponibles para el reconocimiento y modelado de sistemas energéticos multidominio, enmarcados en la necesidad de captar la correspondencia física real del mismo, en aras de proveer bases sólidas para el aprendizaje de las dinámicas complejas y los efectos de su intervención. Para ello se integran la filosofía propuesta por (Willems, 2007b) del enfoque comportamental para el análisis y control de sistemas abiertos e interconectados. Este enfoque se centra en los comportamientos que exhiben los subsistemas y las limitaciones impuestas por las interconexiones. Permite la representación de la dinámica central de un sistema como el conjunto de todas las trayectorias admisibles, y las interconexiones como restricciones en la elección de trayectorias. El comportamiento interconectado puede construirse directamente a partir de los comportamientos de los subsistemas, y también puede obtenerse a partir de

observaciones locales permitiendo una construcción explícita. Este marco libre de representación proporciona una plataforma unificada para el análisis y control de sistemas interconectados.

Reconocimiento y Representación para la Intervención de un Sistema de Múltiples Dominios Energéticos con Correspondencia Física Real.

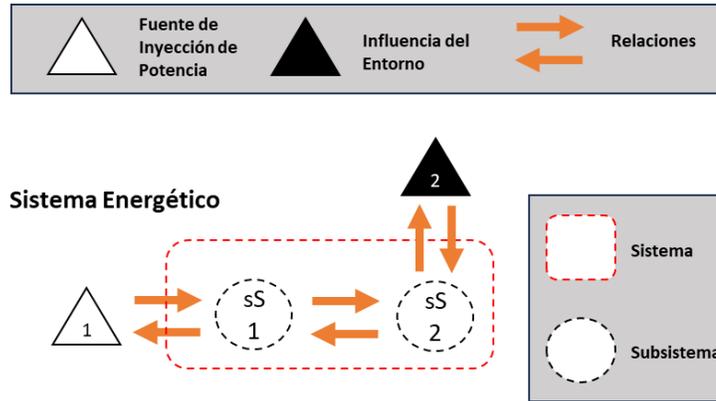


Figura 15: Conceptualización holística de un sistema energético.

La principal ventaja del uso del método Bond Graphs para modelar sistemas energéticos con una estructura compleja (centrales eléctricas marinas, vehículos híbridos, etc.) es la capacidad de modelar los componentes del sistema de diferente naturaleza física utilizando idénticas bases teóricas (Cichy et al., 2015).

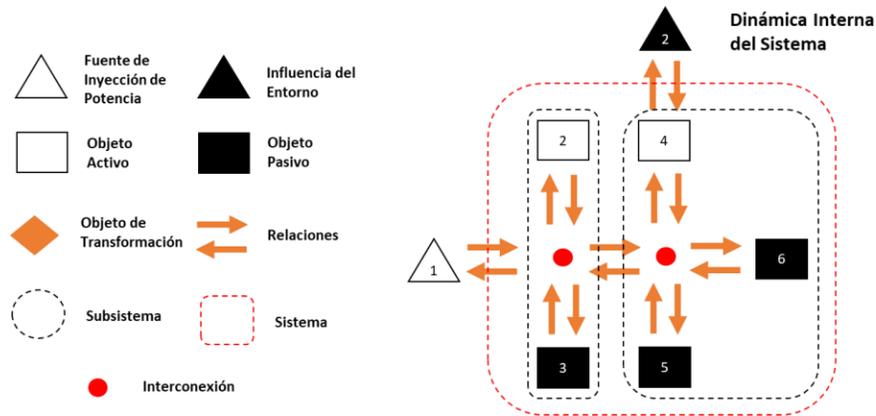


Figura 16: Reconocimiento de las dinámicas internas y las interacciones entre componentes.

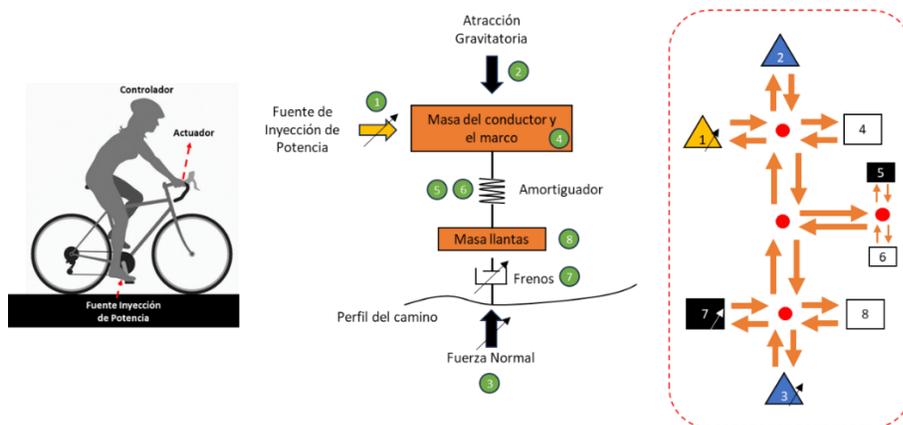


Figura 17: Ejemplo del proceso de representación de un sistema energético con correspondencia física real y la identificación de oportunidades para la intensificación de la eficiencia energética.

Las variables manifiestas se observan y miden directamente, mientras que las variables latentes no se observan directamente, sino que se infiere de las variables manifiestas. Para el caso de la Figura 17 tenemos como variables manifiestas, la dirección, la velocidad, el torque o fuerza angular aplicada, el peso acumulado y la fricción aplicada a las llantas. Como variables latentes, la percepción del terreno (perfil de inclinación del camino), el equilibrio, confianza y la adaptabilidad del controlador, la energía total del sistema, etc.

Como resultado del proceso de reconocimiento se concluye de forma natural que para reducir esfuerzo y por tanto consumo de energía, en la fuente de inyección de potencia es clave intervenir directamente en la fuerza angular aplicada, la fricción aplicada a las llantas, considerando la influencia del perfil de inclinación del camino condicionado por el rango de visión y experiencia del terreno que posee el controlador.

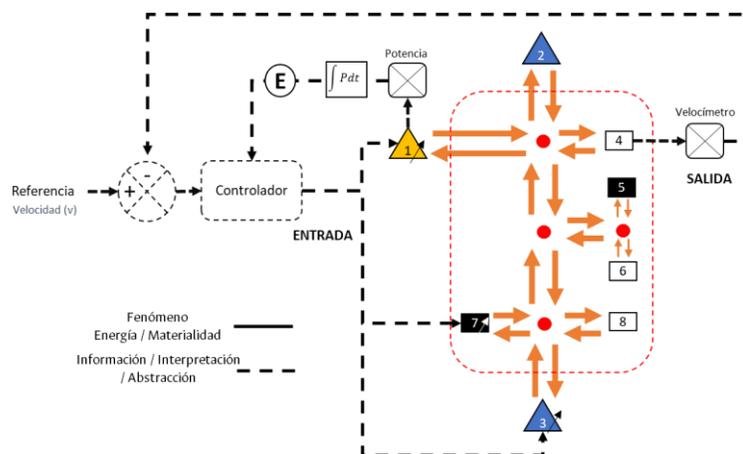


Figura 18: Estrategia para la identificación de oportunidades en eficiencia energética.

Parte II. Desarrollo de la Propuesta

4. Estrategia para la Intensificación de la E.E. de un S.M. por Intervención Directa En su Dinámica

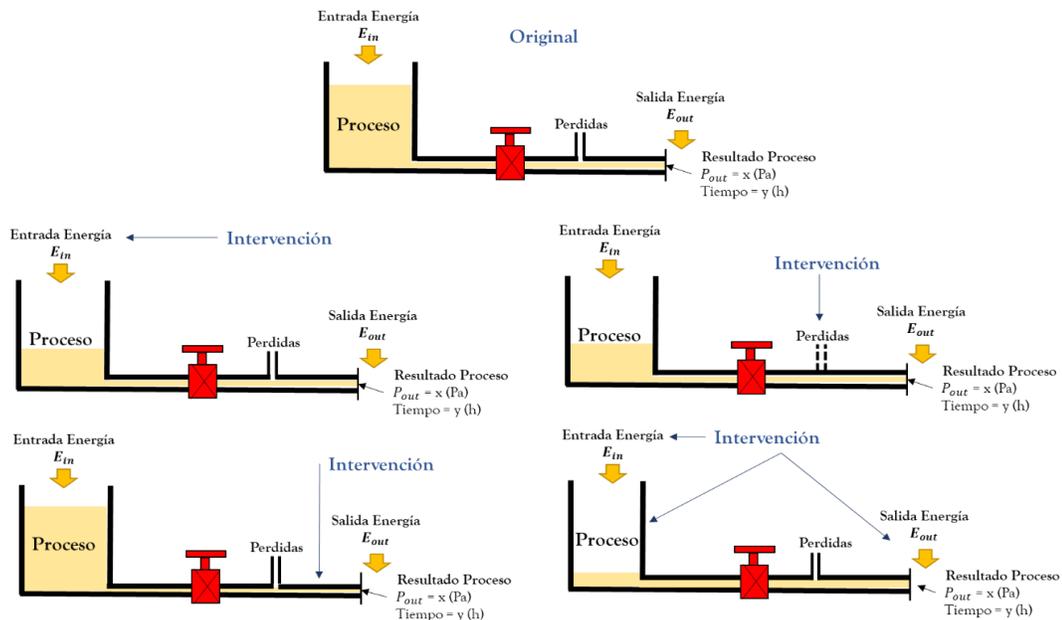


Figura 19: Distintas opciones de intensificación de la eficiencia energética por intervención utilizando la analogía de un sistema hidráulico.

4.1 Inspiración de la propuesta

A continuación, se detalla el proceso generalizado para la identificación de oportunidades de intensificación de la eficiencia energética de un sistema energético por intervención directa en su dinámica. Este planteamiento teórico inspira el desarrollo metodológico propuesto en este documento. La formulación descrita a continuación, surge de los procesos de exploración empíricos, reconocidos en situaciones comunes, aspecto fundamental para este trabajo, no solamente como una inspiración de la propuesta, si no como punto de partida para el desarrollo de este trabajo de investigación.

Reconocimiento del sistemas rnergético

1. Manifestación energética concreta (expresión fenomenológica)

Partiendo del fenómeno energético, se establece la planificación y ejecución deliberada de ajustes operativos específicos al interior del proceso que reflejen la intensificación de la eficiencia energética real del sistema.

2. El reconocimiento comportamental del hecho (observación)

Se realiza una evaluación sistemática y detallada de los patrones de comportamiento del sistema, enfocada en identificar oportunidades para mejorar la eficiencia energética mediante la observación directa y el análisis de su interacción con su entorno en funcionamiento y/o en reposo.

Representación del sistema natural

3. La autoconsciencia y la necesidad de la representación sistémica (abstracción) para su comprensión

Con base en el entendimiento consciente (reconocimiento) y el conocimiento previo de la composición y operación del sistema, se formulan representaciones abstractas del fenómeno energético para comprender la dinámica sistémica en profundidad y proponer puntos de intervención para la intensificación de su eficiencia energética en condiciones de operación deseadas sujeta a restricciones y/o condicionantes específicos.

Aprendizaje de trayectorias comportamentales

4. La experimentación (por intervención) para la obtención de información comportamental de sistema, ampliando y/o delimitando el rango de posibilidades acorde a condicionantes particulares,

Se ejecuta el protocolo de aplicación controlada de ajustes en los puntos de intervención para explorar nuevas posibilidades comportamentales del sistema energético (a través del aprendizaje) sujeto a las condiciones particulares y buscando intensificar la eficiencia energética desde la perspectiva de la fuente de inyección de potencia.

5. El análisis (medición, interpretación, evaluación) para el aprendizaje continuo en función de un comportamiento deseado

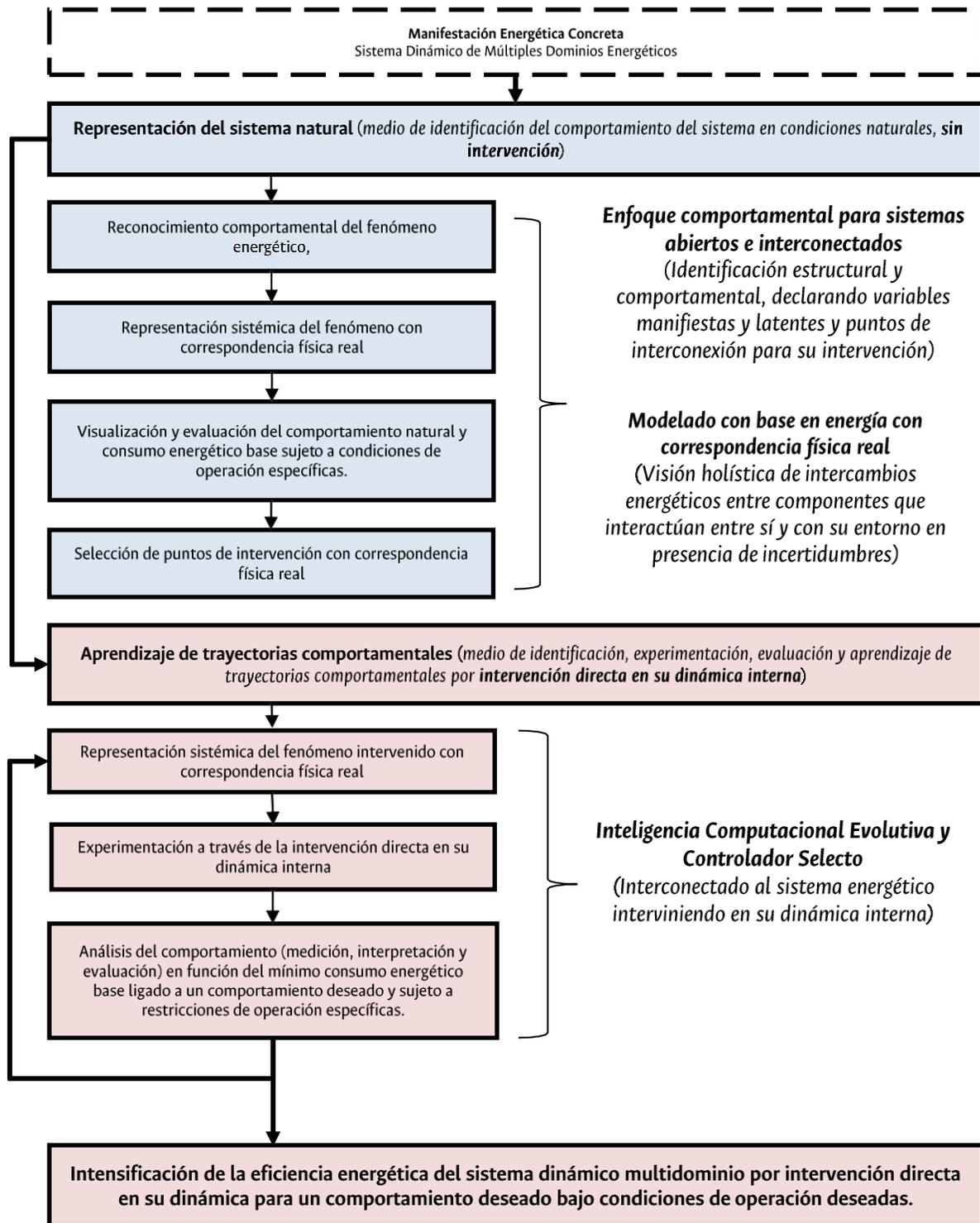
Se analiza el proceso con la implementación de métodos de medición, interpretación y evaluación sistemática, basados en un proceso de aprendizaje continuo, para guiar las prácticas operativas hacia un comportamiento deseado que maximice la eficiencia energética.

6. La retroalimentación de la información integrada a la autoconsciencia vinculada a la representación para proponer nuevas estrategias de intervención

Se ejecuta el proceso de aprendizaje a través del ciclo de retroalimentación constante, donde la información obtenida se utiliza para actualizar la conciencia operativa del sistema, permitiendo la formulación de estrategias innovadoras para intervenciones futuras destinadas a mejorar la eficiencia energética.

Con base en estos criterios generalizado base, se presenta la **Estrategia para la Intensificación de la E.E. de un S.M. por Intervención Directa En su Dinámica.**

4.2 Estrategia para la intensificación de la eficiencia energética de un sistema multidominio por intervención directa en su dinámica



5. Aplicación de la Estrategia: Caso de Estudio Sistema de Refrigeración por Compresión de Vapor

5.1 Representación del sistema natural

5.1.1 Reconocimiento comportamental del fenómeno energético

Los SRCV (Sistemas de Refrigeración por Compresión de Vapor) son el método de producción de frío más ampliamente utilizado a nivel mundial. Aproximadamente el 30% de la energía en el mundo se consume en aplicaciones relacionadas con el aire acondicionado (Jahangeer et al., 2011). Los SRCV integran elementos de múltiples dominios energéticos utilizando el ciclo inverso de Rankine para transferir calor de un espacio de temperatura más baja a uno de temperatura más alta. Este proceso requiere una alta cantidad de energía para su ejecución. La energía proviene de la inyección de potencia de una fuente externa de trabajo electromecánico (W_{comp}), cuya acción de compresión hace circular el refrigerante, que experimenta cambios de fase mientras absorbe y libera calor. El desarrollo del ciclo completo de refrigeración para alcanzar la temperatura deseada dentro de una cámara comienza cuando el refrigerante entra al compresor como vapor saturado (estado 1) y se comprime isotrópicamente hasta alcanzar cierta presión y temperatura en la región sobrecalentada (estado 2). El refrigerante comprimido ingresa al condensador para transferir calor (Q_s) al entorno. El refrigerante abandona el condensador como líquido saturado (estado 3). Para reducir la temperatura del refrigerante, una válvula de expansión aplica una estrangulación adiabática, en el estado 4. La temperatura del refrigerante es muy baja, por lo que absorbe calor (Q_e) en el espacio del evaporador. El refrigerante se calienta para recuperar su estado de vapor saturado repitiendo el ciclo. La Figura 20 representa la transferencia de calor en caso de procesos reversibles. El área bajo la curva para el proceso (estados 4-1) representa el calor absorbido (Q_e) por el refrigerante en el evaporador y el área bajo la curva para el proceso 2-3 representa el calor rechazado (Q_s) en el condensador.

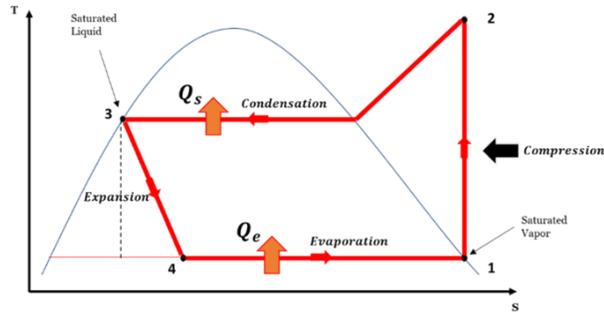


Figura 20: Temperatura-entropía para el ciclo térmico de un SRCV.

En relación con los componentes y los dominios energéticos, un SRCV es una máquina que, desde el dominio eléctrico (motor), realiza una conversión al dominio mecánico rotacional (par y RPM), actuando en el dominio hidráulico (presión y caudal) para finalmente llegar al dominio térmico, como se muestra en la Figura 21.

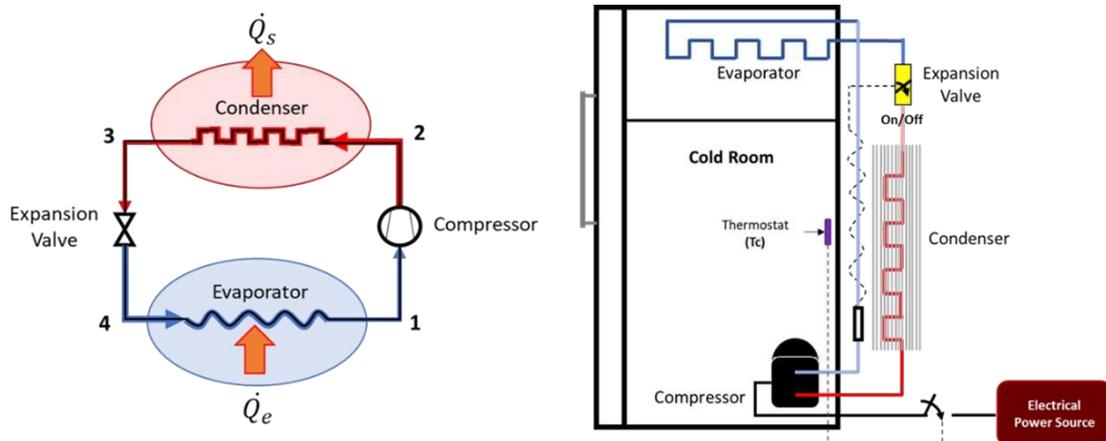


Figura 21: a) Diagrama básico de un SRCV b) Elementos en un refrigerador doméstico.

5.1.2 Representación sistémica del fenómeno con correspondencia física real

Modelo integral del SRCV

El modelo integral del SRCV ha sido desarrollado aplicando la técnica unificada de modelado energético BG. Este proceso comienza utilizando un modelo basado en experimentos (Schné et al., 2015) que solo describe la dinámica de un ciclo térmico, sin explorar los efectos que el compresor impone al resto del sistema y las restricciones respectivas del motor eléctrico. Para superar este obstáculo, se propone representar el ciclo de refrigeración utilizando una técnica de modelado energético unificada que nos permita integrar la dinámica interna del grupo motor-compresor sin perder la correspondencia física real del sistema completo y sin la necesidad de redefinir el modelo experimental inicial. Se detalla el modelo base para el ciclo térmico a continuación, seguido de una descripción del proceso de modelado del sistema completo utilizando la técnica de enlaces de potencia de BG.

Modelo Base del Ciclo Térmico: El modelo térmico base utilizado en este capítulo fue propuesto por (Schné et al., 2015). Este modelo térmico (ve Figura 22), se desarrolló basándose en un experimento con un refrigerador comercial. Los comportamientos dinámicos generados por este modelo corresponden a las actuaciones medidas empíricamente. Temperaturas, resistencias térmicas, flujos y capacidades de almacenamiento de calor se abordan de manera análoga a un circuito eléctrico como voltajes, resistencias, corrientes y condensadores, respectivamente.

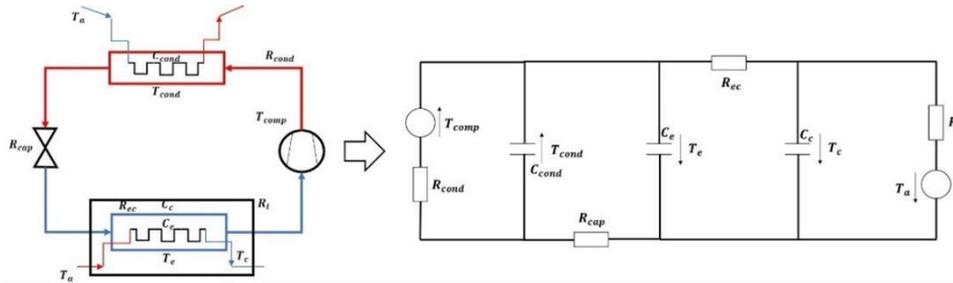


Figura 22: Diagrama básico de la parte térmica de un SRCV y su diagrama eléctrico análogo.

Para representar la dinámica de los intercambiadores de calor, se utilizan elementos acumuladores del tipo C para el evaporador (C_e), condensador (C_{cond}) y también para la cámara fría (C_c). Se utilizan elementos del tipo R para modelar la convección térmica entre el refrigerante y la pared interna de la tubería en las diferentes secciones del circuito térmico. Para la sección entre el compresor y el condensador, se utiliza R_{cond} , y entre el evaporador y la cámara fría, se utiliza R_{ec} . Otro aspecto de este sistema que puede representarse mediante un elemento tipo R es el aislamiento térmico dentro del compartimiento interno, (R_i), en relación con la temperatura ambiente exterior (T_a). El dispositivo de expansión para este modelo se ve como una restricción mecánica (una válvula de estrangulación) del fluido refrigerante representada por R_{cap} . Para la identificación de los parámetros del modelo, se recopilieron datos de medición reales de diferentes condiciones de operación. La Figura 23 muestra las curvas de comportamiento para las etapas de enfriamiento y calentamiento, tanto para la temperatura en el evaporador como en la cámara fría. Se comparan las curvas que provienen de una medición directa y las curvas que se originan del modelo teórico propuesto.

Es importante aclarar que, aunque las dinámicas producidas por este modelo térmico (Schné et al., 2015) coinciden con las observaciones experimentales, el modelo no incluye el sobrecalentamiento. El sobrecalentamiento es importante porque indica si la cantidad de refrigerante que fluye hacia el evaporador es adecuada para la carga. El modelo completo del SRCV (eléctrico+mecánico+hidráulico+térmico) se desarrollará primero sin sobrecalentamiento en la parte térmica para demostrar su construcción a partir de datos experimentales. Posteriormente, se aumentará la complejidad de la parte térmica agregando el circuito de sobrecalentamiento y generando así un modelo integral del SRCV.

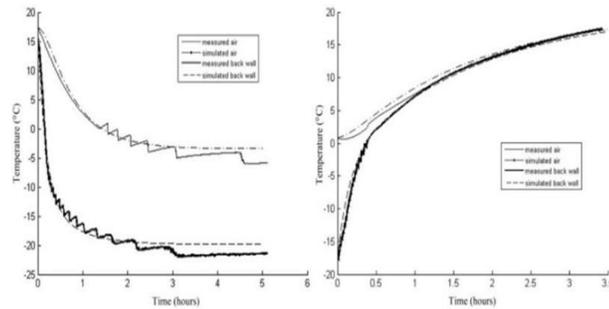


Figura 23: Fase de enfriamiento y calentamiento para la temperatura en la cámara fría y el evaporador. Reproducido de (Schné et al., 2015).

Este modelo representa la operación térmica del refrigerador con suficiente precisión para permitir un control inteligente, pero sin la necesidad de modelar cada pequeño detalle de la operación, aunque no se excluye la posibilidad de aumentar el orden de complejidad si es necesario. En la literatura técnica, existen modelos detallados y precisos (Hermes & Melo, 2008), (Bejarano, 2017), pero en la mayoría de las ocasiones, son demasiado complejos para implementarlos en la vida real. En el caso modelado en este capítulo, no se requiere la precisión fenomenológica que proporcionan. La dinámica general del modelo de ciclo térmico no solo es no lineal, sino que también muestra acoplamientos fuertes entre las entradas o fuentes de excitación y las variables de estado. En la siguiente sección, se discutirá el procedimiento para modelar el ciclo térmico utilizando la técnica unificada BG. Posteriormente, se integrarán las dinámicas del grupo motor-compresor eléctrico.

Modelado del ciclo térmico utilizando la técnica BG

A continuación, se presenta el procedimiento para obtener el modelo gráfico del ciclo térmico del sistema de refrigeración utilizando la técnica BG (ver Figura 24).

- Identificar los esfuerzos y asignarles una unión -0-.
- Identificar todas las diferencias de esfuerzo necesarias para conectar los puertos de todos los elementos. Utilizar una unión -1- y representarlas de esta manera en el BG.
- Identificar los elementos y conectarlos a las uniones respectivas.
- Simplificar el Bond Graph aplicando las reglas de simplificación correspondientes (Hroncová & Gmitterko, 2013).

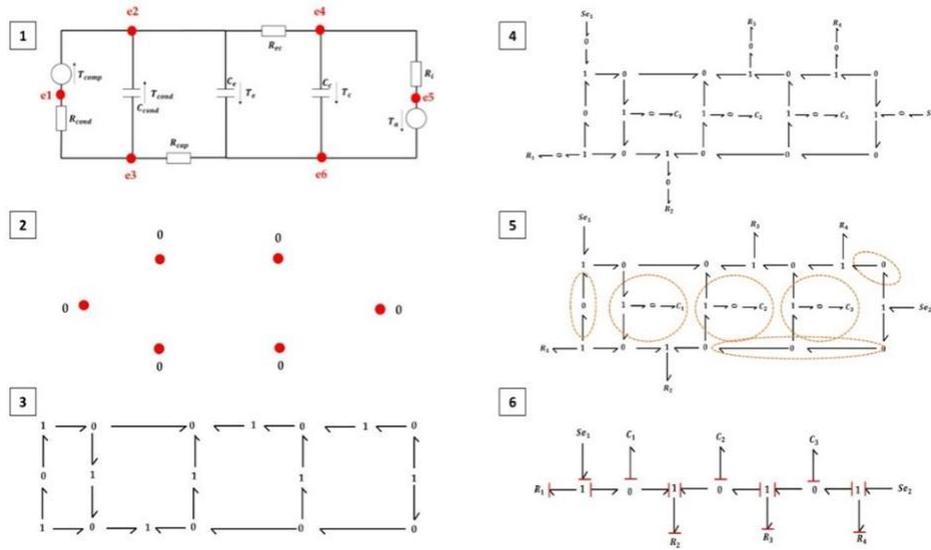


Figura 24: Procedimiento sistemático para obtener el modelo BG del ciclo térmico

Finalmente, se muestra el modelo BG del modelo térmico experimental.

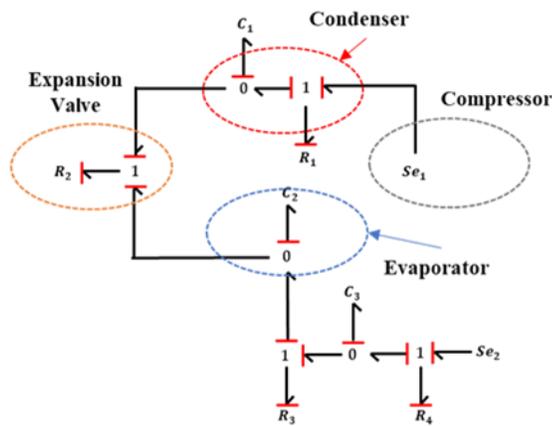


Figura 25: Representación de enlace de potencia del ciclo térmico utilizando la técnica BG.

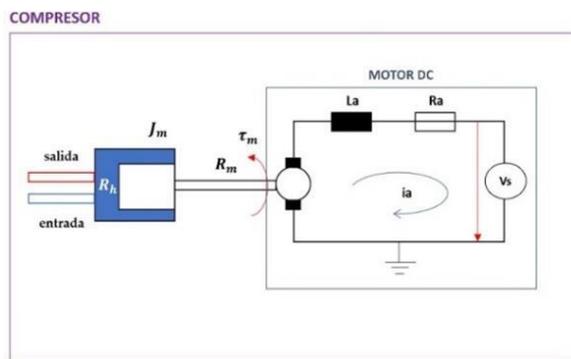


Figura 26: Esquema de un sistema electromecánico.

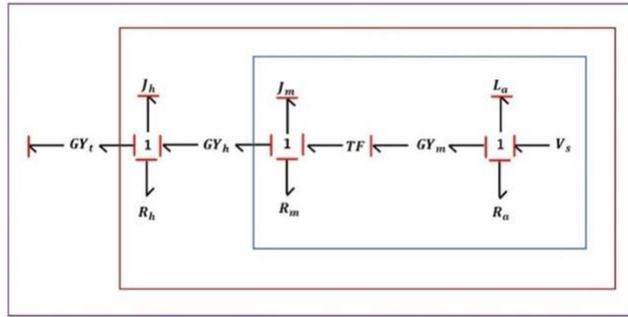


Figura 27: Representación mediante BG para el compresor.

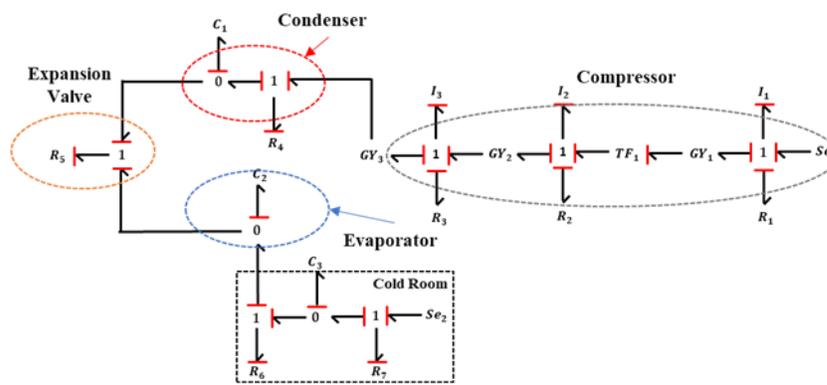


Figura 28: Unión modular del ciclo térmico y el grupo motor-compresor mediante la técnica BG.

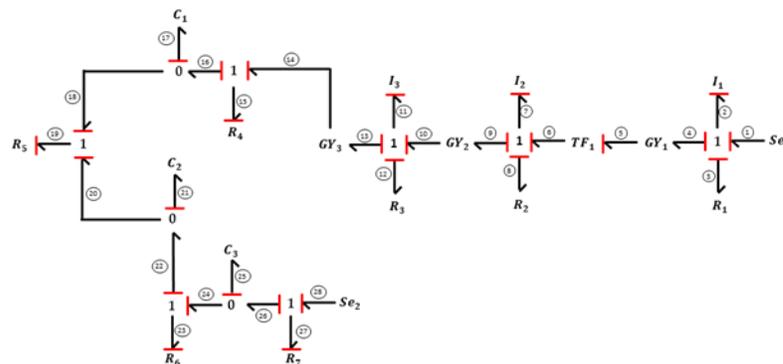


Figura 29: Asignación de flujos y esfuerzos para cada enlace de potencia.

Formulación del Modelo de Variables de Estado del SRCV Completo Sin Temperatura de Sobrecalentamiento

Una vez que se ha desarrollado el modelo gráfico a partir del BG, procedemos a obtener las ecuaciones diferenciales que definen el comportamiento del sistema completo. Estableciendo los valores conocidos, las relaciones entre los elementos del sistema y resolviendo para las incógnitas. Consulte la Tabla 3.

Tabla 3: Muestra la equivalencia entre las variables BG (variables del fondo) y las variables físicas.

Valores Conocidos	Relaciones/Uniones		
Esfuerzos	Flujos		Flujos
$e_1 = Se_1$	$e_1 = e_2 + e_3 + e_4$	$e_3 = R_1 * f_3$	$f_{16} = f_{17} + f_{18}$
$e_{17} = qc_1/C_1$	$e_6 = e_7 + e_8 + e_9$	$e_8 = R_2 * f_8$	$f_{22} = f_{21} + f_{20}$
$e_{21} = qc_2/C_2$	$e_{10} = e_{11} + e_{12} + e_{13}$	$e_{12} = R_3 * f_{12}$	$f_{26} = f_{25} + f_{24}$
$e_{25} = qc_3/C_3$	$e_{14} = e_{15} + e_{16}$	$e_{15} = R_4 * f_{15}$	$f_1 = f_2 = f_3 = f_4$
$e_{28} = Se_3$	$e_{19} = e_{18} + e_{20}$	$e_{19} = R_5 * f_{19}$	$f_6 = f_7 = f_8 = f_9$
	$e_{24} = e_{23} + e_{22}$	$e_{23} = R_6 * f_{23}$	$f_{10} = f_{11} = f_{12} = f_{13}$
Flujos	$e_{28} = e_{27} + e_{26}$	$e_{27} = R_7 * f_{27}$	$f_{14} = f_{15} = f_{16}$
$f_2 = p_{I1}/I_1$	$e_{16} = e_{17} = e_{18}$	$e_4 = k_1 * f_5$	$f_{18} = f_{19} = f_{20}$
$f_7 = p_{I2}/I_2$	$e_{20} = e_{21} = e_{22}$	$e_9 = k_2 * f_{10}$	$f_{22} = f_{23} = f_{24}$
$f_{11} = p_{I3}/I_3$	$e_{24} = e_{25} = e_{26}$	$e_{13} = k_3 * f_{14}$	$f_{26} = f_{27} = f_{28}$
Ecuaciones para Esfuerzos y Flujos			
$e_1 = Se_1$	$f_1 = \left(\frac{1}{I_1}\right) * p_{I1}$		
$e_2 = Se_1 - \left(\frac{R_1}{I_1}\right) * p_{I1} - \left(\frac{k_1}{I_2 * tf}\right) * p_{I2}$	$f_2 = \left(\frac{1}{I_1}\right) * p_{I1}$		
$e_3 = \left(\frac{R_1}{I_1}\right) * p_{I1}$	$f_3 = \left(\frac{1}{I_1}\right) * p_{I1}$		
$e_4 = \left(\frac{k_1}{I_2 * tf}\right) * p_{I2}$	$f_4 = \left(\frac{1}{I_1}\right) * p_{I1}$		
$e_5 = \left(\frac{k_1}{I_1}\right) * p_{I1}$	$f_5 = \left(\frac{1}{I_2 * tf}\right) * p_{I2}$		
$e_6 = \left(\frac{k_1}{I_1 * tf}\right) * p_{I1}$	$f_6 = \left(\frac{1}{I_2}\right) * p_{I2}$		
$e_7 = \left(\frac{k_1}{I_1 * tf}\right) * p_{I1} - \left(\frac{R_2}{I_2}\right) * p_{I2} - \left(\frac{k_2}{I_3}\right) * p_{I3}$	$f_7 = \left(\frac{1}{I_2}\right) * p_{I2}$		
$e_8 = \left(\frac{R_2}{I_2}\right) * p_{I2}$	$f_8 = \left(\frac{1}{I_2}\right) * p_{I2}$		
$e_9 = \left(\frac{k_2}{I_3}\right) * p_{I3}$	$f_9 = \left(\frac{1}{I_2}\right) * p_{I2}$		
$e_{10} = \left(\frac{k_2}{I_2}\right) * p_{I2}$	$f_{10} = \left(\frac{1}{I_3}\right) * p_{I3}$		
$e_{11} = \left(\frac{k_2}{I_2}\right) * p_{I2} - \left(\frac{R_3}{I_3}\right) * p_{I3} - \left(\frac{k_3^2}{R_4 * I_3}\right) * p_{I3} - \left(\frac{k_3}{R_4 * C_1}\right) * q_{C1}$	$f_{11} = \left(\frac{1}{I_3}\right) * p_{I3}$		
$e_{12} = \left(\frac{R_3}{I_3}\right) * p_{I3}$	$f_{12} = \left(\frac{1}{I_3}\right) * p_{I3}$		

$e_{13} = \left(\frac{k_3^2}{R_4 * I_3}\right) * p_{I3} - \left(\frac{k_3}{R_4 * C_1}\right) * q_{C1}$	$f_{13} = \left(\frac{1}{I_3}\right) * p_{I3}$
$e_{14} = \left(\frac{k_3}{I_3}\right) * p_{I3}$	$f_{14} = \left(\frac{k_3}{R_4 * I_3}\right) * p_{I3} - \left(\frac{1}{R_4 * C_1}\right) * q_{C1}$
$e_{15} = \left(\frac{k_3}{I_3}\right) * p_{I3} - \left(\frac{1}{C_1}\right) * q_{C1}$	$f_{15} = \left(\frac{k_3}{R_4 * I_3}\right) * p_{I3} - \left(\frac{1}{R_4 * C_1}\right) * q_{C1}$
$e_{16} = \left(\frac{1}{C_1}\right) * q_{C1}$	$f_{16} = \left(\frac{k_3}{R_4 * I_3}\right) * p_{I3} - \left(\frac{1}{R_4 * C_1}\right) * q_{C1}$
$e_{17} = \left(\frac{1}{C_1}\right) * q_{C1}$	$f_{17} = \left(\frac{k_3}{R_4 * I_3}\right) * p_{I3} - \left(\frac{1}{R_4 * C_1}\right) * q_{C1}$ $- \left(\frac{1}{R_5 * C_1}\right) * q_{C1}$ $+ \left(\frac{1}{R_5 * C_2}\right) * q_{C2}$
$e_{18} = \left(\frac{1}{C_1}\right) * q_{C1}$	$f_{18} = \left(\frac{1}{R_5 * C_1}\right) * q_{C1} + \left(\frac{1}{R_5 * C_2}\right) * q_{C2}$
$e_{19} = \left(\frac{1}{C_1}\right) * q_{C1} + \left(\frac{1}{C_2}\right) * q_{C2}$	$f_{19} = \left(\frac{1}{R_5 * C_1}\right) * q_{C1} + \left(\frac{1}{R_5 * C_2}\right) * q_{C2}$
$e_{20} = \left(\frac{1}{C_2}\right) * q_{C2}$	$f_{20} = \left(\frac{1}{R_5 * C_1}\right) * q_{C1} + \left(\frac{1}{R_5 * C_2}\right) * q_{C2}$
$e_{21} = \left(\frac{1}{C_2}\right) * q_{C2}$	$f_{21} = \left(\frac{1}{R_6 * C_3}\right) * q_{C3} - \left(\frac{1}{C_2}\right) \left(\frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_5}\right) * q_{C2}$ $- \left(\frac{1}{R_5 * C_1}\right) * q_{C1}$
$e_{22} = \left(\frac{1}{C_2}\right) * q_{C2}$	$f_{22} = \left(\frac{1}{R_6 * C_3}\right) * q_{C3} - \left(\frac{1}{C_2 * R_6}\right) * q_{C2}$
$e_{23} = \left(\frac{1}{C_3}\right) * q_{C3} - \left(\frac{1}{C_2}\right) * q_{C2}$	$f_{23} = \left(\frac{1}{R_6 * C_3}\right) * q_{C3} - \left(\frac{1}{C_2 * R_6}\right) * q_{C2}$
$e_{24} = \left(\frac{1}{C_3}\right) * q_{C3}$	$f_{24} = \left(\frac{1}{R_6 * C_3}\right) * q_{C3} - \left(\frac{1}{C_2 * R_6}\right) * q_{C2}$
$e_{25} = \left(\frac{1}{C_3}\right) * q_{C3}$	$f_{25} = \left(\frac{1}{R_7}\right) * Se_3 - \left(\frac{1}{C_3}\right) \left(\frac{1}{R_7} + \frac{1}{R_6}\right) * q_{C3}$ $+ \left(\frac{1}{C_2 * R_6}\right) * q_{C2}$
$e_{26} = \left(\frac{1}{C_3}\right) * q_{C3}$	$f_{26} = \left(\frac{1}{R_7}\right) * Se_3 - \left(\frac{1}{C_3 * R_7}\right) * q_{C3}$
$e_{27} = Se_3 - \left(\frac{1}{C_3}\right) * q_{C3}$	$f_{27} = \left(\frac{1}{R_7}\right) * Se_3 - \left(\frac{1}{C_3 * R_7}\right) * q_{C3}$
$e_{28} = Se_3$	$f_{28} = \left(\frac{1}{R_7}\right) * Se_3 - \left(\frac{1}{C_3 * R_7}\right) * q_{C3}$

Tabla 4: Variables del modelo energético integral del SRCV (primera versión).

Nomenclatura Bond Graph	Nomenclatura Sistemas de Múltiples Dominios Energéticos
-------------------------	---

Fuentes			
Se_1	Fuentes de esfuerzo generalizado	V_s	Fuente de voltaje
Se_2	Fuentes de esfuerzo generalizado	T_a	Temperatura ambiente de la habitación
Resistencias			
R_1	Resistencia generalizada	R_a	Resistencia eléctrica
R_2	Resistencia generalizada	R_m	Fricción mecánica
R_3	Resistencia generalizada	R_h	Fricción hidráulica
R_4	Resistencia generalizada	R_{cond}	Resistencia térmica compresor-condensador
R_5	Resistencia generalizada	R_{cap}	Restricción mecánica (válvula expansión)
R_6	Resistencia generalizada	R_{ec}	Resistencia térmica evaporador-cámara de frío
R_7	Resistencia generalizada	R_i	Resistencia térmica externo-interior
R_8	Resistencia generalizada	R_{sh}	Resistencia térmica sobrecalentamiento
R_9	Resistencia generalizada	R_s	Perdida térmica
Capacidad de almacenamiento de energía potencial			
C_1	Capacitancia generalizada	C_{cond}	Capacidad de almacenamiento de calor del condensador
C_2	Capacitancia generalizada	C_e	Capacidad de almacenamiento de calor del evaporador
C_3	Capacitancia generalizada	C_c	Capacidad de almacenamiento de calor de la cámara de frío
Capacidades de Almacenamiento de Energía Cinética			
I_1	Inercia generalizada	L_a	Inductancia eléctrica
I_2	Inercia generalizada	J_m	Inercia rotacional mecánica
I_3	Inercia generalizada	J_h	Inercia hidráulica
Girador			
k_1	Proporción de dominio	r_m	Cambio de dominio eléctrico-mecánico
k_2	Proporción de dominio	r_h	Cambio de dominio mecánico-hidráulico
k_3	Proporción de dominio	r_t	Cambio de dominio hidráulico-térmico
tf	Proporción de transformación	tf	Conversión de revoluciones por minuto

La Tabla 6 describe el sistema de ecuaciones diferenciales para el modelo completo del SRCV utilizando la notación del sistema físico.

Tabla 5: Ecuaciones diferenciales del SRCV completo sin sobrecalentamiento.

Nomenclatura BG	Nomenclatura Sistema Energético
$\frac{df_{I1}}{dt} = - \left(\frac{R_1 * f_{I1} + \frac{k_1}{tf} * f_{I2} - Se_1}{I_1} \right)$	$\frac{di_a}{dt} = - \left(\frac{R_a * i_a + \frac{r_m}{tf} * \omega_m - V_s}{L_a} \right)$

$\frac{df_{I2}}{dt} = - \left(\frac{-\frac{k_1}{tf} * f_{I1} + R_2 * f_{I2} + k_2 * f_{I3}}{I_2} \right)$	$\frac{d\omega_m}{dt} = - \left(\frac{-\frac{r_m}{tf} * i_a + R_m * \omega_m + r_h * Q_h}{J_m} \right)$
$\frac{df_{I3}}{dt} = - \left(\frac{k_2 * f_{I2} - R_3 * f_{I3} + \frac{k_3(e_{C1} - k_3 * f_{I3})}{R_4}}{I_3} \right)$	$\frac{dQ_h}{dt} = - \left(\frac{r_h * \omega_m - R_h * Q_h + \frac{r_t(T_{Cond} - r_t * Q_h)}{R_{cond}}}{J_h} \right)$
$\frac{de_{C1}}{dt} = - \left(\frac{\frac{e_{C1} - k_3 * f_{I3} + e_{C1} + e_{C2}}{R_4}}{C_1} \right)$	$\frac{dT_{Cond}}{dt} = - \left(\frac{\frac{T_{Cond} - r_t * Q_h + T_{Cond} + T_e}{R_{cond}}}{C_{cond}} \right)$
$\frac{de_{C2}}{dt} = \frac{\frac{e_{C3} - e_{C2} - \frac{e_{C1} + e_{C2}}{R_5}}{R_6}}{C_2}$	$\frac{dT_e}{dt} = \frac{\frac{T_C - T_e - \frac{T_{Cond} + T_e}{R_{cap}}}{R_{ec}}}{C_e}$
$\frac{de_{C3}}{dt} = - \left(\frac{\frac{e_{C3} - e_{C2} + \frac{e_{C3} - Se_2}{R_7}}{R_6}}{C_3} \right)$	$\frac{dT_c}{dt} = - \left(\frac{\frac{T_c - T_e + \frac{T_c - T_a}{R_t}}{R_e}}{C_c} \right)$

El modelo diferencial en la Tabla 6 reproduce la dinámica térmica observada experimentalmente (Schné et al., 2015). Inicialmente, esa dinámica se reproducía exclusivamente mediante acciones térmicas. A partir del modelo diferencial en la Tabla 6, estas dinámicas se generan ahora considerando los efectos correspondientes al motor eléctrico, la carga mecánica y el resultado del compresor, todos actuando sobre el circuito térmico.

La formulación del modelo de variables de estado del SRCV completo con temperatura de sobrecalentamiento.

El circuito térmico, que incluye la temperatura de sobrecalentamiento, se muestra en la figura 30.

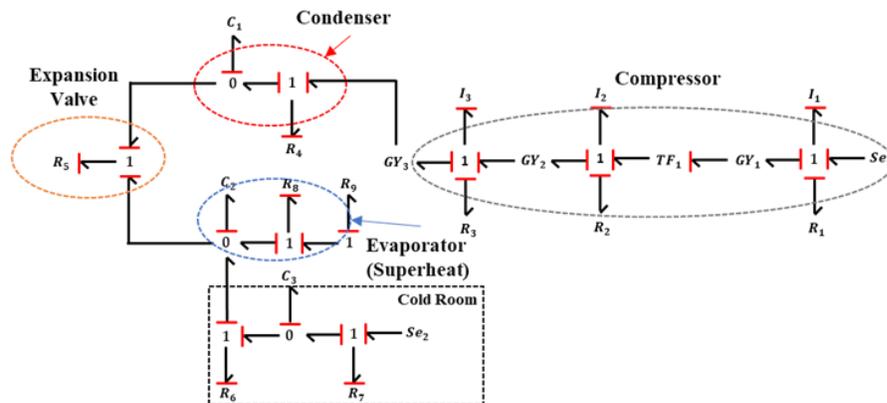


Figura 30: Representación por BG del circuito térmico que incluye el sobrecalentamiento.

El BG completamente etiquetado del modelo integral del SRCV se encuentra en la figura 31. Este modelo incluye todos los elementos que componen un SRCV, es decir, motor eléctrico, carga rotacional, compresor y circuito térmico con sobrecalentamiento.

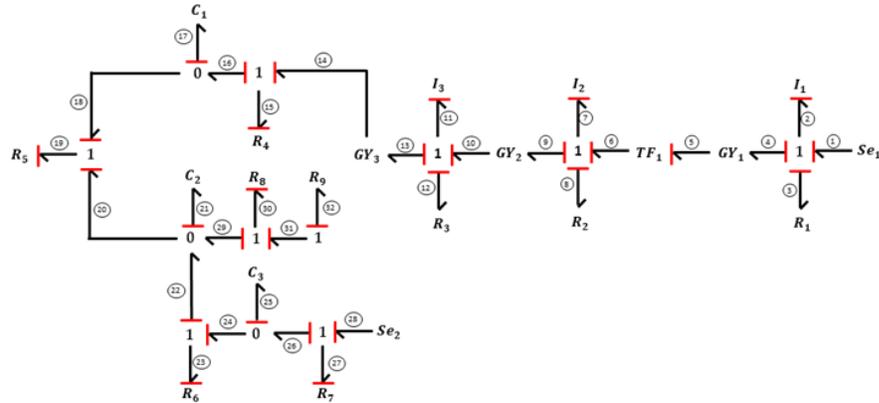


Figura 31: Unión modular del ciclo térmico completo y el grupo motor-compresor mediante BG, con asignación de flujos y esfuerzos para cada enlace de potencia.

Tabla 6: Ecuaciones diferenciales del sistema de refrigeración

Nomenclatura BG	Nomenclatura Sistema Energético
$\frac{df_{I1}}{dt} = - \left(\frac{R_1 * f_{I1} + \frac{k_1}{tf} * f_{I2} - Se_1}{I_1} \right)$	$\frac{di_a}{dt} = - \left(\frac{R_a * i_a + \frac{r_m}{tf} * \omega_m - V_S}{L_a} \right)$
$\frac{df_{I2}}{dt} = - \left(\frac{-\frac{k_1}{tf} * f_{I1} + R_2 * f_{I2} + k_2 * f_{I3}}{I_2} \right)$	$\frac{d\omega_m}{dt} = - \left(\frac{-\frac{r_m}{tf} * i_a + R_m * \omega_m + r_h * Q_h}{J_m} \right)$
$\frac{df_{I3}}{dt} = - \left(\frac{k_2 * f_{I2} - R_3 * f_{I3} + \frac{k_3(e_{C1} - k_3 * f_{I3})}{R_4}}{I_3} \right)$	$\frac{dQ_h}{dt} = - \left(\frac{r_h * \omega_m - R_h * Q_h + \frac{r_t(T_{Cond} - r_t * Q_h)}{R_{cond}}}{J_h} \right)$
$\frac{de_{C1}}{dt} = - \left(\frac{\frac{e_{C1} - k_3 * f_{I3}}{R_4} + \frac{e_{C1} + e_{C2}}{R_5}}{C_1} \right)$	$\frac{dT_{Cond}}{dt} = - \left(\frac{\frac{T_{Cond} - r_t * Q_h}{R_{cond}} + \frac{T_{Cond} + T_e}{R_{cap}}}{C_{cond}} \right)$
$\frac{de_{C2}}{dt} = - \frac{\frac{e_{C1} + e_{C2}}{R_5} - \frac{e_{C3} - e_{C2}}{R_6} + \frac{e_{C2}}{R_8 * \left(\frac{R_9}{R_8} + 1\right)}}{C_2}$	$\frac{dT_e}{dt} = - \frac{\frac{T_{Cond} + T_e}{R_{cap}} - \frac{T_{CR} * T_e}{R_{ec}} + \frac{T_e}{R_{sh} * \left(\frac{R_8}{R_{sh}} + 1\right)}}{C_e}$

$\frac{de_{c3}}{dt} = - \left(\frac{\frac{e_{c3} - e_{c2}}{R_6} + \frac{e_{c3} - Se_2}{R_7}}{C_3} \right)$	$\frac{dT_c}{dt} = - \left(\frac{\frac{T_c - T_e}{R_e} + \frac{T_c - T_a}{R_t}}{C_c} \right)$
---	--

5.1.3 Visualización y evaluación del comportamiento natural y consumo energético base sujeto a condiciones de operación específicas

Análisis del comportamiento del SRCV

El modelo integral del SRCV se construyó mediante la unión del modelo térmico experimental con el modelo electromecánico-hidráulico teórico. Se utilizaron los parámetros de la Tabla 6 para la simulación de este modelo. Los valores del modelo térmico provienen del proceso experimental de identificación de sistemas aplicado en un refrigerador doméstico comercial que funciona con R404a como fluido refrigerante. Los parámetros de los modelos propuestos en los dominios eléctrico, mecánico e hidráulico fueron tomados de los manuales técnicos tanto del refrigerador original como de los componentes comerciales.

Tabla 7: Parámetros del modelo integral del SRCV.

$V_s = 220 \text{ v}$	$R_h = 1e - 5 \text{ Pa. s/m}^3$	$R_{ec} = 0.325 \text{ }^\circ\text{C/W}$	$C_{cond} = 0.6 \text{ J}$	$r_m = 0.4042$
$L_a = 0.0185 \text{ H}$	$J_h = 0.00018 \text{ N. s/m}^2$	$R_i = 0.475 \text{ }^\circ\text{C/W}$	$C_e = 0.64 \text{ J}$	$r_h = 1.7988$
$R_a = 9.01 \text{ } \Omega$	$T_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$	$R_{sh} = 8.5 \text{ }^\circ\text{C/W}$	$C_c = 3.2 \text{ J}$	$r_t = 76.7397$
$R_m = 1e - 5 \text{ N. m. s/rad}$	$R_{cond} = 0.099 \text{ }^\circ\text{C/W}$	$R_s = 2.5 \text{ }^\circ\text{C/W}$		$tf = 9.549$
$J_m = 0.00015 \text{ Kg. m}^2$	$R_{cap} = 0.01 \text{ }^\circ\text{C/W}$			

La Figura 32 muestra la verificación por parte del modelo holístico del SRCV del comportamiento experimental original para las dos variables de estado: Temperatura en la Cámara Fría y Temperatura en el Evaporador. Ahora, otras variables de estado del SRCV pueden ser observadas a través del modelo holístico, Figura 33.

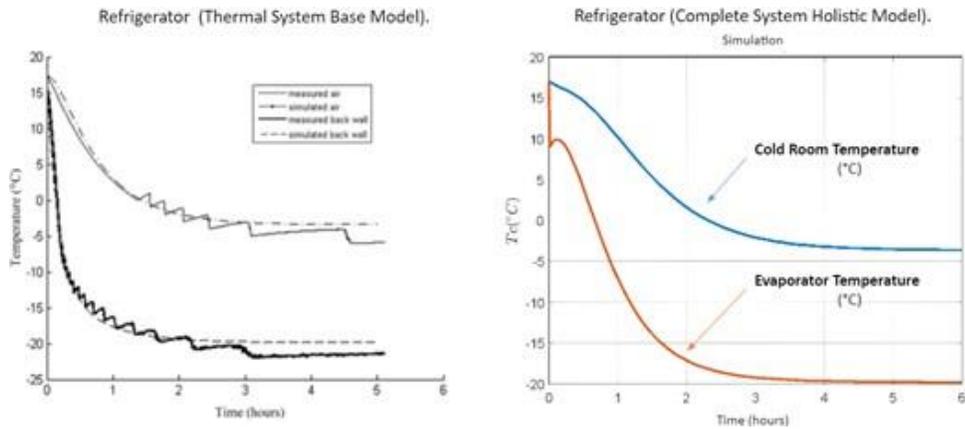


Figura 32: Comparación de la temperatura en el evaporador y en la cámara fría entre el modelo térmico experimental y el modelo integral del SRCV.

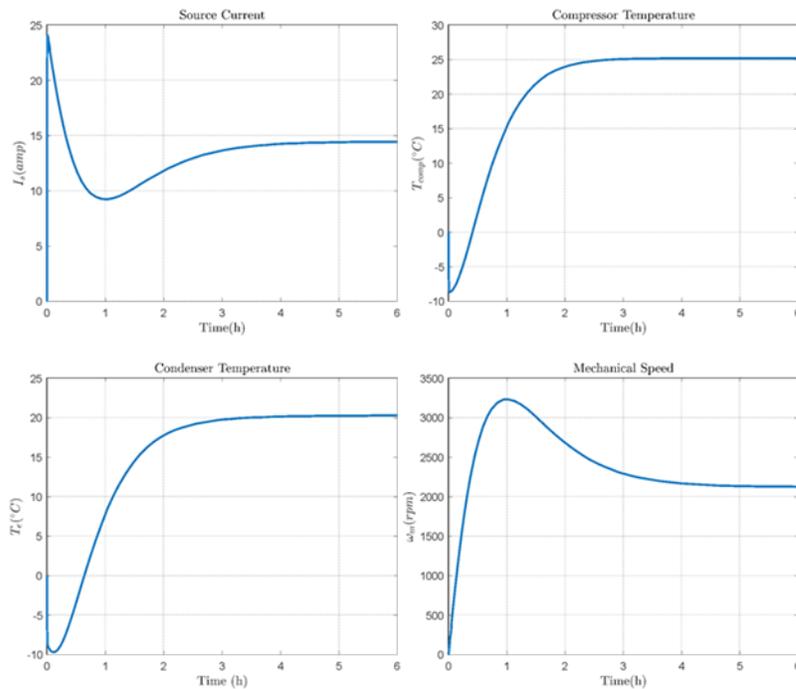


Figura 33: Otras variables de estado (dinámicas internas) del modelo integral del SRCV.

El modelo integral de todo el SRCV permite una visión holística del sistema, logrando identificar formas de intervención que faciliten minimizar el consumo de la potencia de entrada (energía eléctrica) mientras se aseguran las condiciones operativas deseadas. El consumo general de energía se calcula mediante la integración de la potencia durante un período definido de observación. En el modelo BG, este cálculo es inmediato debido al conocimiento de las variables de esfuerzo y flujo en todo momento, ecuación (22).

$$E(t) = \int P(t)dt = \int e(t) * f(t)dt \quad (22)$$

A partir de la ecuación (22), es posible conocer el impacto real en la energía debido a una intervención directa en la dinámica del proceso. Al tener siempre disponibles las variables de esfuerzo y flujo, tanto para el sistema completo como para cualquiera de sus componentes, se pueden expresar las informaciones de potencia. De esta manera, se establece un análisis de energía, inicialmente basado en el control tradicional "Encendido-Apagado" comúnmente utilizado en los refrigeradores domésticos. Posteriormente, se realizará un análisis de energía con las nuevas tecnologías de control continuo.

Operación mediante el control tradicional de encendido y apagado.

Convencionalmente, cuando la temperatura interior es alta y supera el valor deseado, el compresor se enciende; de lo contrario, se apaga. La operación de encendido/apagado no solo consume una gran cantidad de energía, sino que también provoca grandes variaciones en la temperatura interior. La Figura 34 muestra el comportamiento original de encendido y apagado medido experimentalmente.

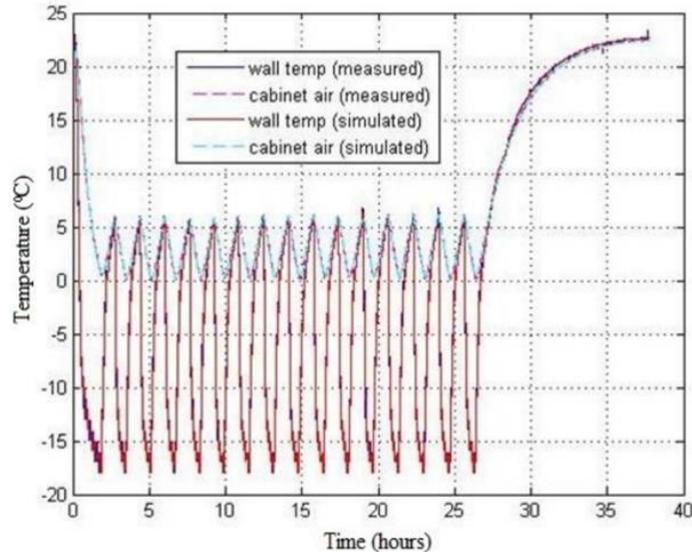


Figura 34: Simulación del comportamiento real frente al modelo térmico experimental. Temperatura en la cámara fría (azul) y temperatura en el evaporador (rojo). Tomado de (Schné et al., 2015).

Por otro lado, la figura 35 muestra la reproducción de este comportamiento de encendido y apagado logrado con el modelo integral del SRCV. El cambio en la frecuencia depende de la configuración de la válvula de encendido y apagado utilizada. En la simulación holística, los extremos y la oscilación media son los mismos obtenidos en la experimentación.

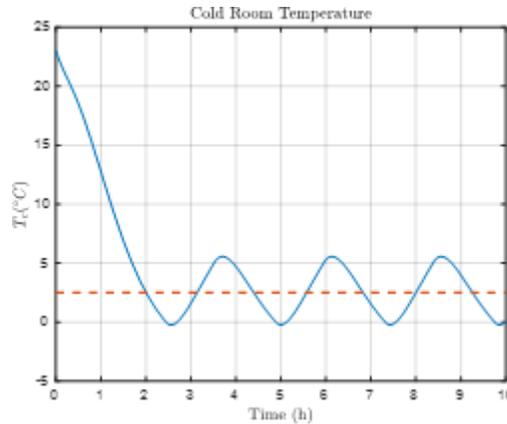


Figura 35: Comportamiento de encendido y apagado logrado con el modelo integral del SRCV.

La energía total consumida por el SRCV es la que proviene de la fuente de alimentación eléctrica. Su cálculo resulta de la multiplicación de la variable de esfuerzo, $e1$, por la variable de flujo, $f1$. La energía es la integración de este producto, como se muestra en la ecuación (23). El cálculo del consumo total de energía del SRCV bajo la dinámica tradicional de encendido y apagado, durante un período de trabajo de 25 horas, es $E_{fuente} = 3.7482e + 04$ joules.

$$E_{source} = \int P_{source}(t)dt = \int V_s(t) * i_a(t)dt \quad (23)$$

5.2 Aprendizaje de trayectorias comportamentales

5.2.1 Selección de puntos de intervención con correspondencia física real

Para intensificar la eficiencia energética de un sistema de refrigeración por compresión de vapor, es crucial seleccionar puntos de intervención estratégicos, esto implica un análisis detallado del sistema existente, identificación de puntos críticos, evaluación de opciones de mejora, análisis de costos y beneficios, y finalmente considerar su implementación y seguimiento continuo para garantizar la optimización del rendimiento del sistema y la reducción del consumo de energía a lo largo del tiempo.

Análisis del sistema existente: Se realiza un análisis detallado del sistema para identificar áreas críticas que afectan la eficiencia energética. Recientemente, los sistemas modernos de refrigeración han comenzado a incorporar compresores de velocidad variable para mejorar la eficiencia energética y el rendimiento de enfriamiento. Por esta razón, se diseñaron dos controladores para el SRCV para gestionar la temperatura de la cámara fría a partir de un compresor de velocidad variable, que se proyecta como parte de las nuevas tecnologías que se desean implementar en estos sistemas.

Tanto la velocidad del motor del compresor como el grado de apertura de la válvula de expansión son puntos clave que pueden optimizarse para mejorar la eficiencia del sistema.

Identificación de puntos críticos: Tanto la velocidad del motor del compresor como el grado de apertura de la válvula de expansión son puntos críticos que pueden tener un impacto significativo en la eficiencia energética del sistema de refrigeración. La velocidad del motor afecta directamente el rendimiento del compresor, mientras que el grado de apertura de la válvula de expansión influye en el flujo de refrigerante hacia el evaporador.

Evaluación de opciones de mejora: Se consideran diversas opciones para mejorar la eficiencia energética en estos puntos críticos. Para la velocidad del motor, se pueden implementar sistemas de control de velocidad variable para adaptarse mejor a las condiciones de carga. Para la válvula de expansión, se pueden utilizar válvulas electrónicas o ajustar manualmente el grado de apertura para optimizar el superenfriamiento.

Análisis de costos y beneficios: Se realiza un análisis exhaustivo de los costos y beneficios asociados con cada opción de mejora. Se consideran los costos de inversión inicial, así como los ahorros potenciales en consumo de energía a lo largo del tiempo. En muchos casos, las intervenciones que optimizan la velocidad del motor y el grado de apertura de la válvula de expansión pueden ofrecer un retorno de la inversión favorable debido a los significativos ahorros energéticos.

Implementación y seguimiento: Una vez seleccionadas las intervenciones, se implementan en el sistema y se monitorean continuamente para evaluar su efectividad. Se realizan ajustes según sea necesario para garantizar que el sistema funcione de manera óptima y se logren los objetivos de eficiencia energética a lo largo del tiempo.

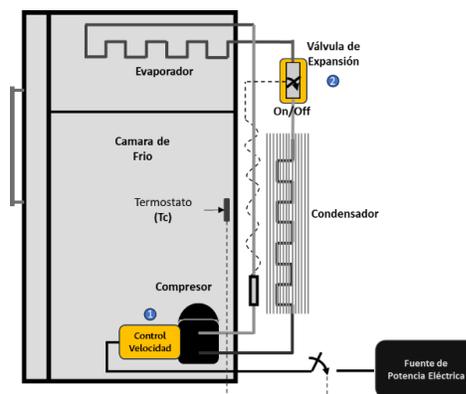


Figura 36: Selección de los puntos de intervención con base en el reconocimiento del sistema.

Compresor

Intervenir en la velocidad del compresor de un sistema de refrigeración puede tener un impacto significativo en su consumo energético debido a los siguientes factores:

- **Regulación de la capacidad:** Al ajustar la velocidad del compresor, se puede modular la capacidad de enfriamiento del sistema según las necesidades reales de refrigeración en un momento dado. Si el sistema de refrigeración es capaz de reducir su capacidad cuando la carga de refrigeración es baja, puede evitar el funcionamiento innecesario a plena capacidad, lo que reduce el consumo de energía.
- **Ciclo de funcionamiento:** Al controlar la velocidad del compresor, se puede optimizar el ciclo de funcionamiento del sistema de refrigeración. Esto puede permitir que el compresor opere en condiciones más eficientes durante períodos de carga parcial, lo que resulta en un menor consumo de energía en comparación con el funcionamiento a velocidad constante.
- **Reducción de pérdidas:** La reducción de la velocidad del compresor puede disminuir las pérdidas internas en el sistema de refrigeración, como las pérdidas de presión y las pérdidas de calor debido a la fricción. Esto puede mejorar la eficiencia general del sistema y reducir el consumo de energía.
- **Menor arranque y parada:** Al mantener una velocidad constante en lugar de arrancar y detener el compresor repetidamente, se pueden evitar picos de consumo de energía asociados con los ciclos de arranque y parada frecuentes. Esto puede ser especialmente relevante en sistemas con demanda variable de refrigeración.

Válvula de Expansión

Intervenir en el grado de apertura de la válvula de expansión de un sistema de refrigeración puede tener un impacto en su consumo energético debido a varios factores:

- **Control del flujo de refrigerante:** La válvula de expansión regula el flujo de refrigerante hacia el evaporador del sistema de refrigeración. Al ajustar el grado de apertura de la válvula, se puede controlar la cantidad de refrigerante que entra en el evaporador. Si el flujo de refrigerante es demasiado alto, puede resultar en una sobrealimentación del evaporador, lo que conduce a una mayor carga de trabajo para el compresor y un mayor consumo de energía. Por otro lado, si el flujo de refrigerante es insuficiente, el sistema puede no alcanzar la capacidad de enfriamiento deseada, lo que también puede aumentar el consumo de energía al hacer que el compresor funcione por más tiempo para mantener las temperaturas deseadas.
- **Adaptación a las condiciones de carga:** Las condiciones de carga del sistema de refrigeración pueden variar con el tiempo debido a factores como la temperatura ambiente, la carga térmica del espacio refrigerado y la cantidad de productos almacenados. Ajustar el grado de apertura de la válvula de expansión permite adaptar el sistema a estas variaciones, lo que puede mejorar la eficiencia energética al garantizar un funcionamiento óptimo del sistema en diferentes condiciones de carga.

5.2.2 Representación sistémica del fenómeno intervenido con correspondencia física real

La Figura 37 y Figura 38 muestran el proceso de representación sistémica del fenómeno intervenido con correspondencia física real. En ambos casos veremos la presencia activa del controlador en la dinámica interna del proceso, logrando de esta forma iniciar el proceso de

experimentación y aprendizaje. Este proceso se retroalimenta con base en la información relevantes para el estudio, como ser la temperatura de la cámara de frío y el consumo de energía requerido por la fuente de inyección de potencia. Para el caso de la Figura 377 se utiliza un variador de velocidad para el compresor como elemento activo para incidir dentro del proceso. Y en la Figura 388 se propone la acción conjunta del variador de velocidad para el compresor como la inclusión de una válvula de expansión regulable.

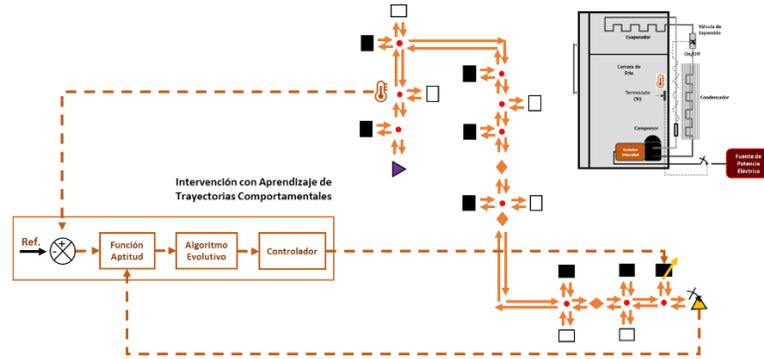


Figura 37: Representación para la intervención directa de un sistema multidominio a partir del control de velocidad del compresor.

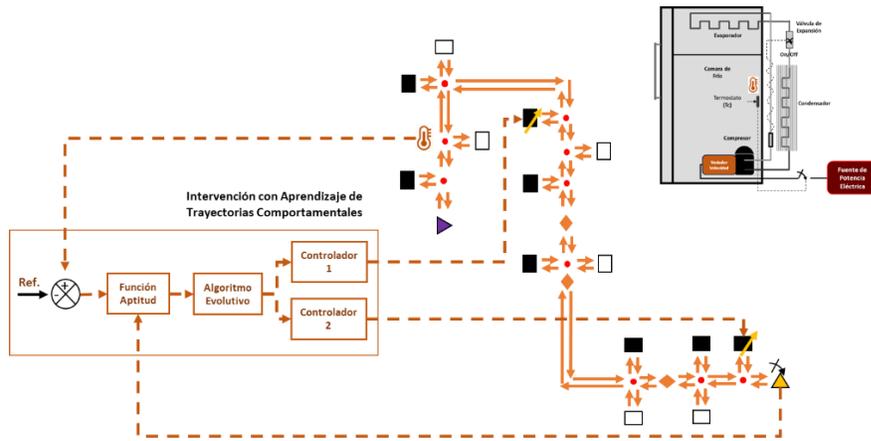


Figura 38: Representación para la intervención directa de un sistema multidominio a partir del control de velocidad del compresor y el grado apertura de la válvula de expansión.

5.2.3 Experimentación a través de la intervención directa en su dinámica interna

Aprendizaje de trayectorias por intervención directa

Este proceso implementa un sistema inteligente para el reconocimiento, evaluación y aprendizaje de rutas de comportamiento del sistema multidominio. El diseño de controladores para el SRCV es independiente del modelo, en el sentido de que su ajuste se basa en datos. Este

proceso se lleva a cabo mediante un método de aprendizaje evolutivo de trayectorias, que se ha utilizado en otros casos complejos como el control de rango dividido (Soto. & Hernandez-Riveros., 2019) y el ajuste del PID del Benchmark de la IFAC (Soto et al., 2018).

Una descripción gráfica del método de diseño del controlador se encuentra en la **Figura 37**. En este caso, el modelo integral basado en energía para el SRCV se utiliza únicamente como generador de datos para ajustar los controladores a las condiciones de operación deseados sujeto a perturbaciones y restricciones. Esto es posible al tener disponible información del comportamiento y consumo energético de los componentes y variables individuales, así como también del sistema en su conjunto.

Un aspecto crucial para la búsqueda de soluciones como producto de la intervención directa en las dinámicas internas es la declaración explícita de restricciones y condicionantes específicos de sus componentes. Este objetivo es alcanzable a través de la evaluación y selección de soluciones técnicamente viables descritas en la función de aptitud. Esto facilita al algoritmo evolutivo desarrollar un proceso efectivo de búsqueda de soluciones viables para los objetivos deseados.

Equilibrio entre consumo energético y efectividad para alcanzar objetivos

Otro aspecto relevante de esta propuesta es extender los criterios de búsqueda a soluciones que integren en igual de importancia, tanto la efectividad para alcanzar los objetivos de operación, en este caso, lograr en menos tiempo alcanzar la temperatura deseada, como también reducir el consumo de energía del sistema. Este equilibrio se logra considerando un parámetro entre ambos objetivos, de manera que no se condicione la búsqueda a soluciones mutuamente excluyentes.

5.2.4 Análisis del comportamiento (medición, interpretación y evaluación) para la intensificación de la eficiencia energética y sujeto a condiciones de operación específicas y restricciones.

5.2.4.1 Condiciones de operación del sistema

Temperatura promedio y banda de histéresis: La temperatura promedio de 3 grados Celsius indica el nivel general de enfriamiento deseado para el espacio refrigerado. La banda de histéresis de 5 a 0 grados Celsius determina el rango dentro del cual el sistema de refrigeración opera, es decir, el sistema se activa cuando la temperatura alcanza los 5 grados Celsius y se desactiva cuando la temperatura baja a los 0 grados Celsius.

Perturbaciones debido a la apertura de la cámara de frío: Las perturbaciones derivadas de la apertura de la cabina de frío pueden provocar fluctuaciones en la temperatura del espacio refrigerado. Cuando la cabina se abre, el aire más cálido del exterior ingresa al espacio refrigerado, lo que puede provocar un aumento repentino en la temperatura. El termostato detectará este cambio y activará el sistema de refrigeración para volver a enfriar el espacio hasta alcanzar la temperatura promedio establecida de 3 grados Celsius. Este ciclo de

activación y desactivación del sistema de refrigeración puede ocurrir con mayor frecuencia en respuesta a las perturbaciones causadas por la apertura de la cabina de frío.

5.2.4.2 Restricciones de operación y seguridad por componentes

Las Figura 39 y Figura 40 ilustran un conjunto de trayectorias de comportamiento debido a la intervención directa en el proceso. Las salidas 1, 2, 3 y 4 corresponden a la estrategia de control discreto. Las salidas 5, 6 y 7 corresponden a la estrategia de control continuo. El modelo integral permite observar todas las variables del sistema (manifiestas y latentes) simultáneamente y calcular el consumo de energía de todo el sistema, así como de sus componentes individuales, mientras se logra la referencia deseada. Las estrategias se aplicaron para cumplir con la condición operativa de 3 °C en la cámara fría junto con la disminución del consumo total de energía del SRCV. Al abordar cualquier propuesta de intervención en el sistema, es fundamental tener en cuenta los límites descritos en su operación normal para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente a lo largo del tiempo. Solo se permite ensayar duplas entrada + salida que admita la planta, es decir, las entradas deben cumplir con todas las restricciones del comportamiento, y aun con este condicionamiento en las entradas solo se aceptan sus salidas si también pertenecen al mismo. En el caso de las estrategias de control continuo, un aspecto relevante a considerar es la estabilidad, descartando rutas de comportamiento que impliquen variaciones súbitas para las principales variables manifiestas del sistema durante el periodo de tiempo definido.

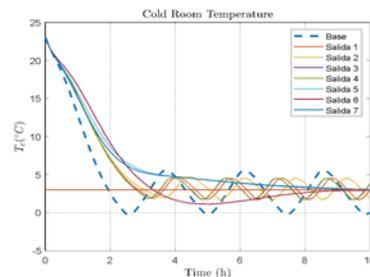


Figura 39: Trayectorias de comportamiento de la temperatura de salida aplicando las estrategias de intervención en el SRCV.

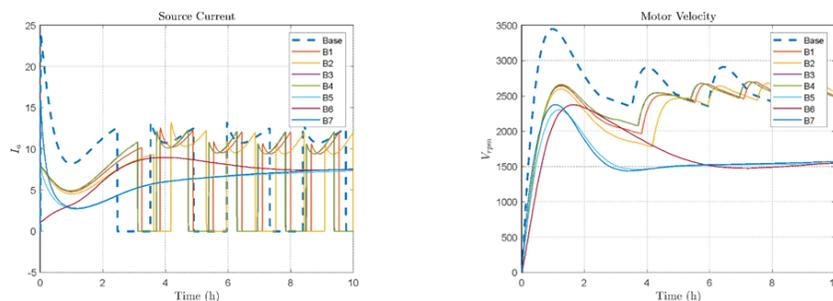
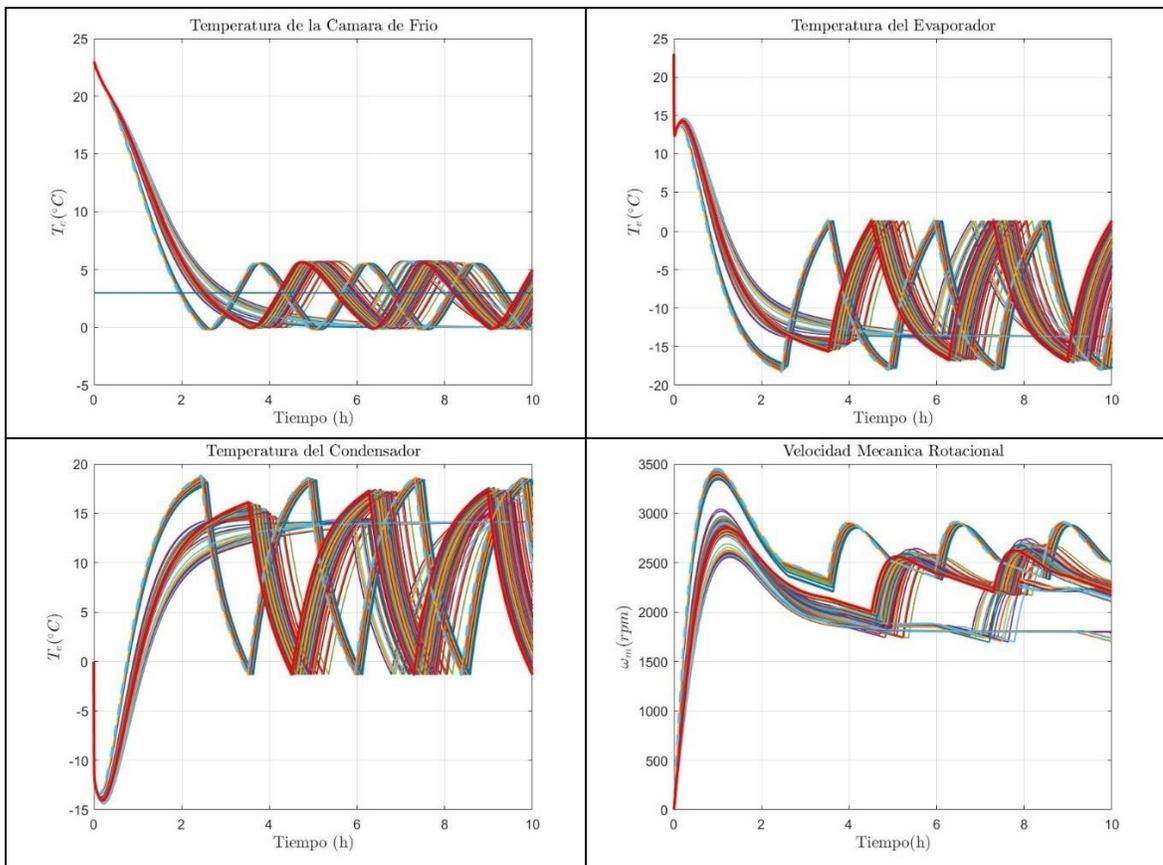


Figura 40: Trayectorias de comportamiento de la corriente eléctrica y la velocidad del motor aplicando estrategias de intervención en el SRCV.

6. Resultados

El resumen de los resultados que incluyen el proceso de aprendizaje de rutas de comportamiento para la intensificación de la eficiencia energética del sistema pueden apreciarse en la Figura 41, Figura 42, Figura 43, Figura 44 y Figura 45. En ella se podrá apreciar con una línea más gruesa y roja el comportamiento selecto para todos los casos. El valor de comportamiento de referencia puede verse a través de la línea punteada. Finalmente, en la Tabla 8 se presenta un resumen del consumo energético para la ruta de comportamiento selecta, como resultado de la aplicación de la estrategia.

6.1 Intervención No. 1 en la velocidad del compresor. Control On-Off (SISO)



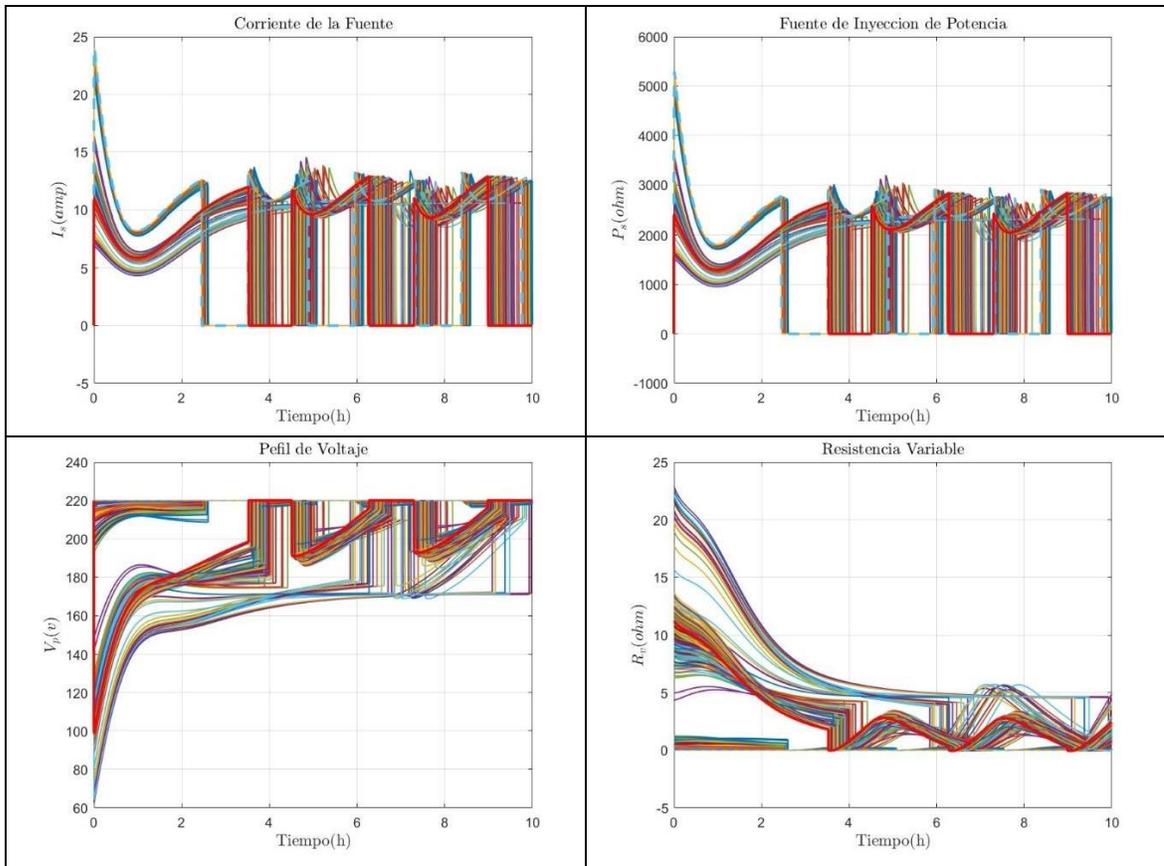
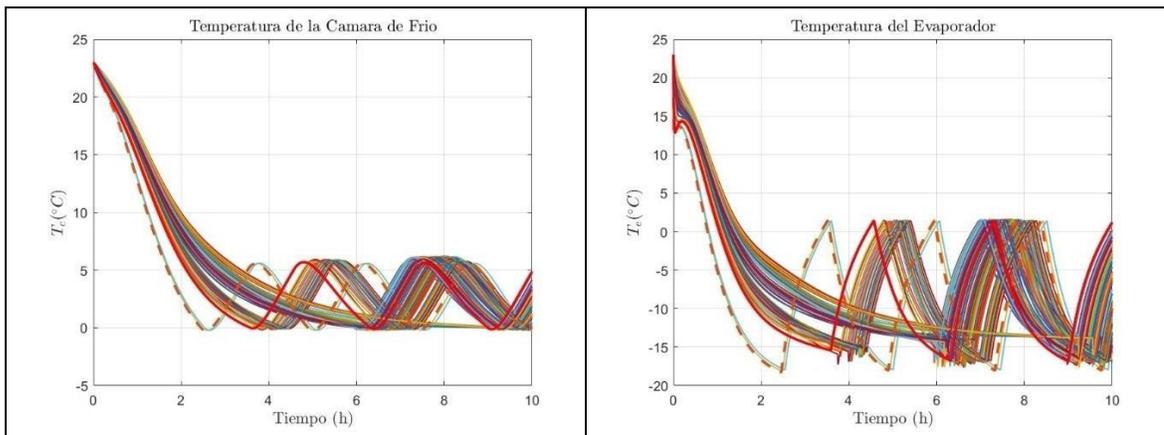
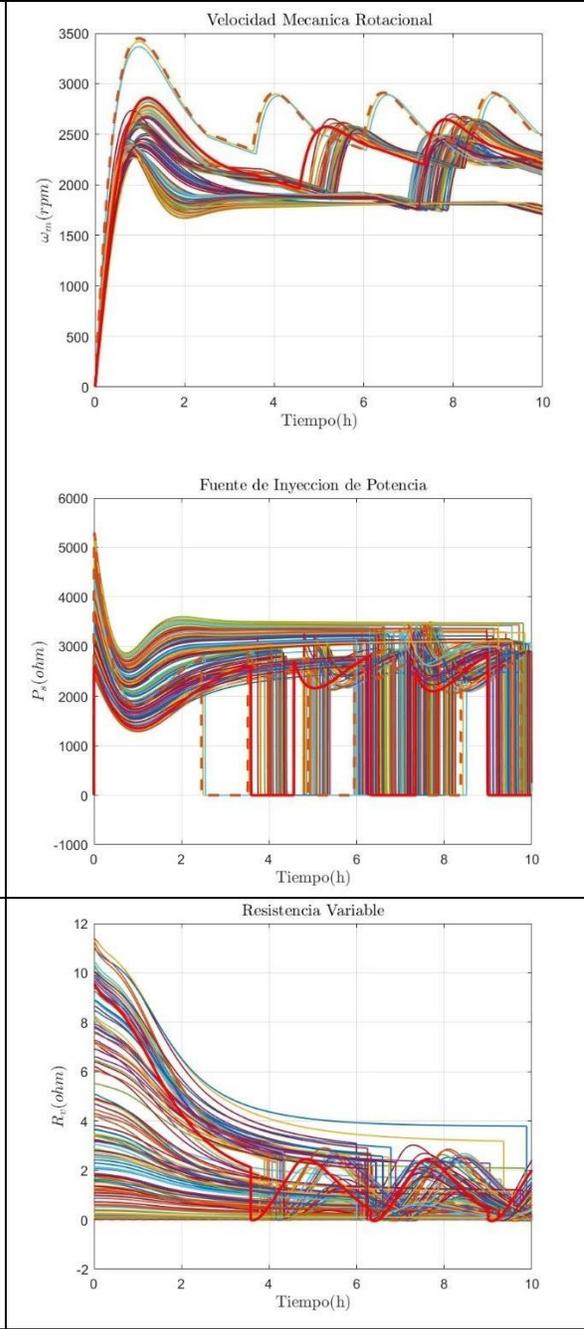
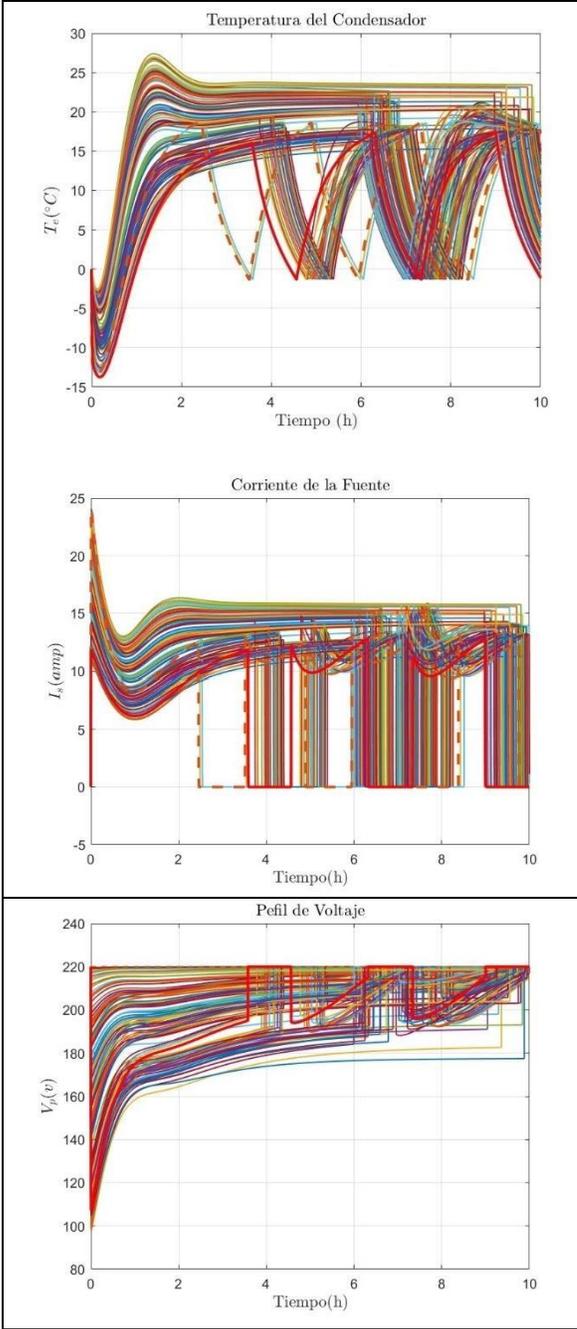


Figura 41: Comportamientos del sistema interviniendo el compresor en modo discreto.

6.2 Intervención No. 2 en la velocidad del compresor y la apertura de la válvula de expansión. Control On-Off (MIMO)

Para el primer caso de intervención, el comportamiento selecto se





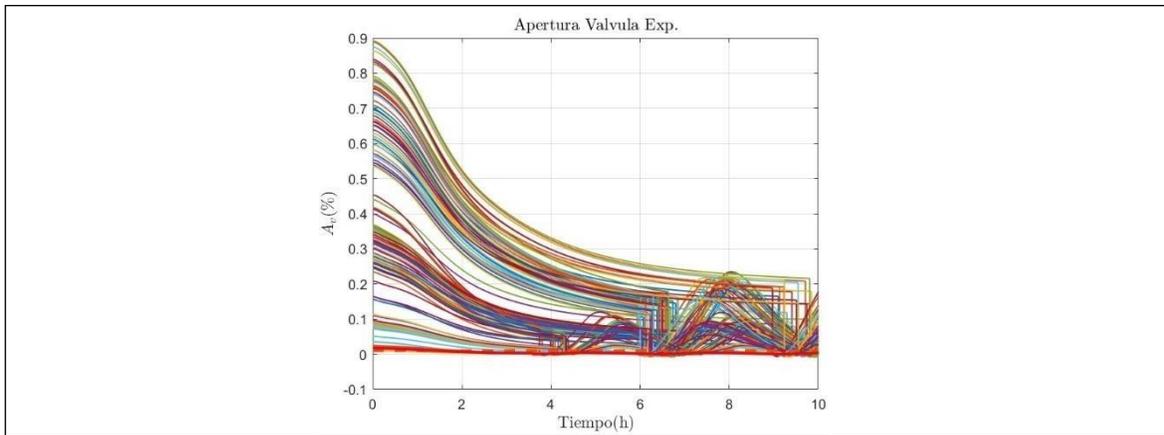
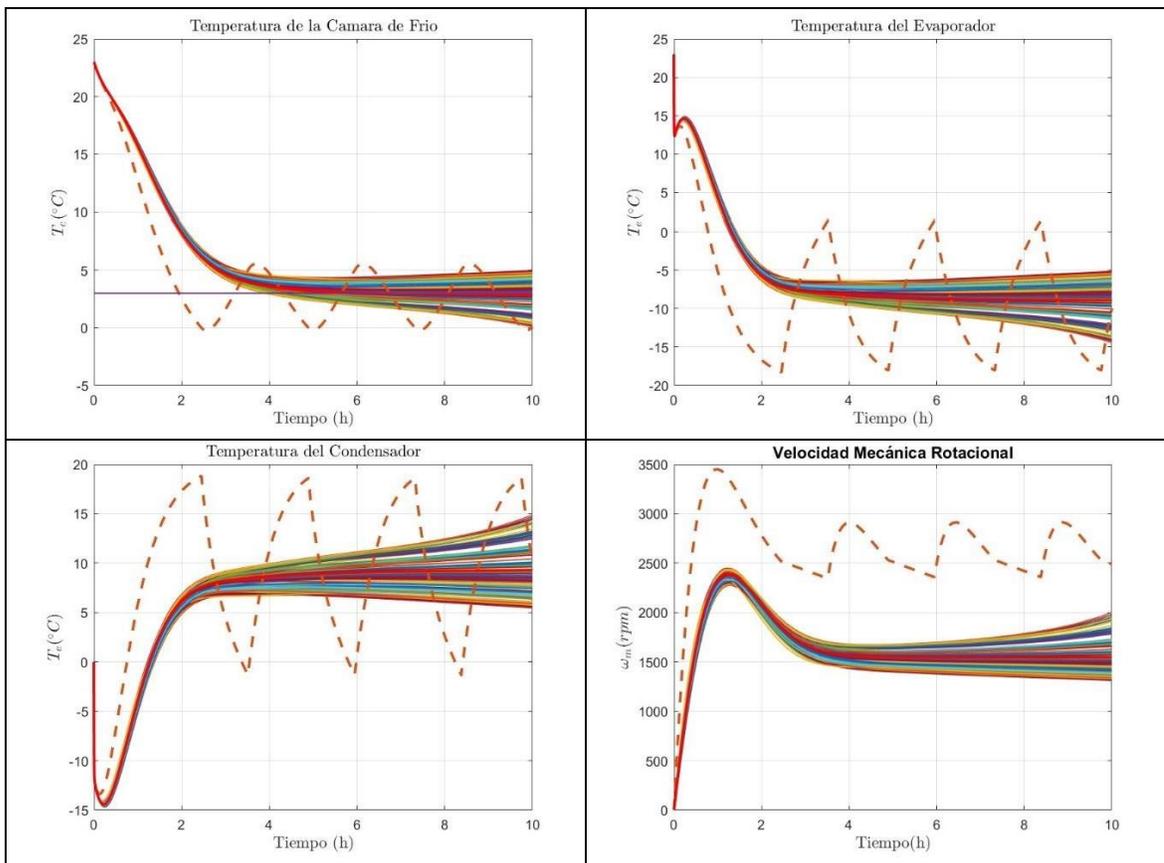


Figura 42: Comportamientos del sistema interviniendo el compresor y la válvula de expansión en modo discreto.

6.3 Intervención No. 3 en la velocidad del compresor. Control Continuo (SISO)



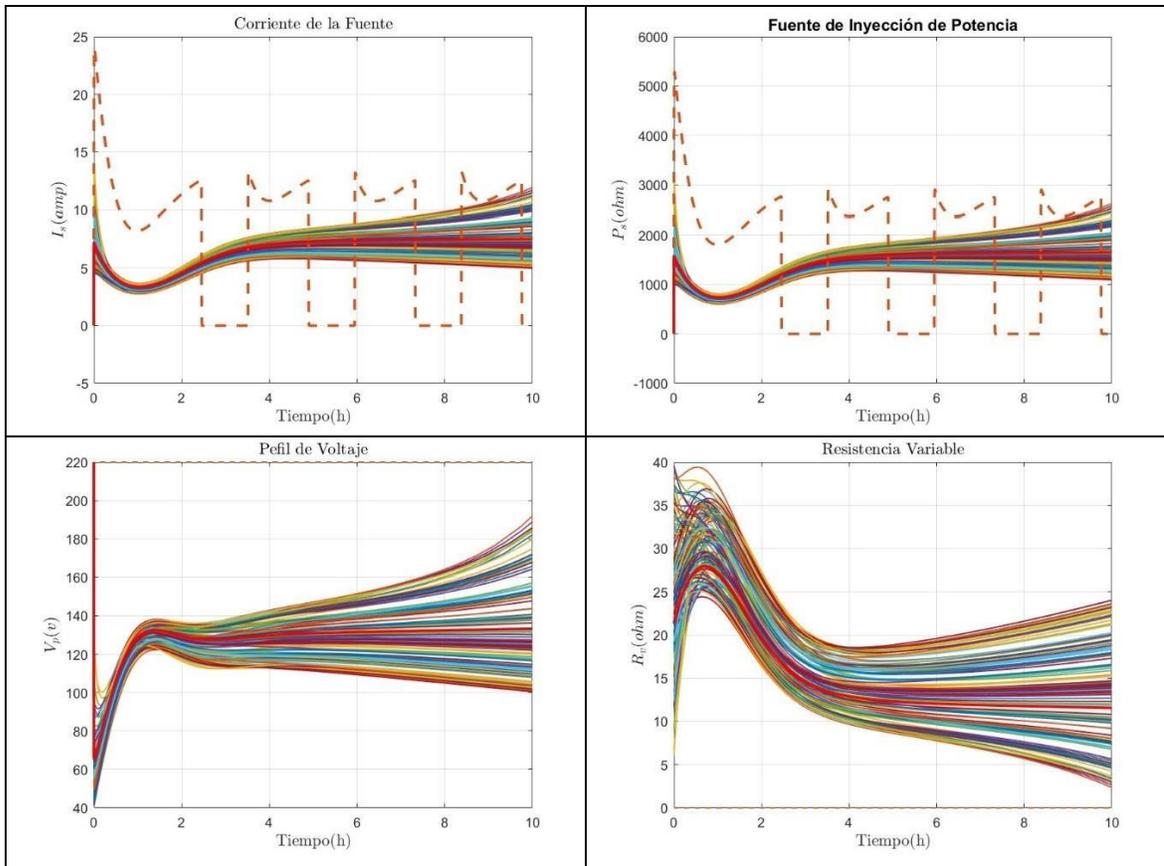
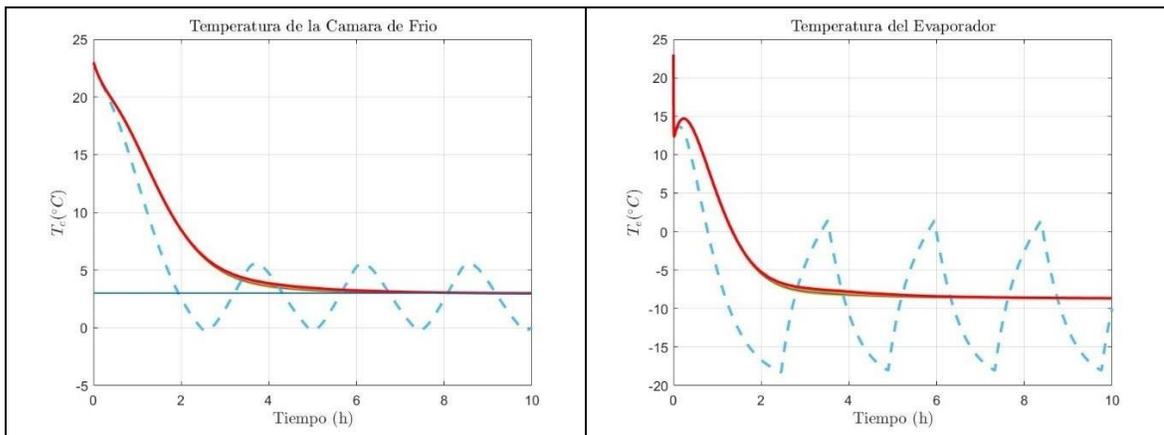


Figura 43: Comportamientos del sistema interviniendo el compresor en modo continuo sin restricciones de estabilidad.



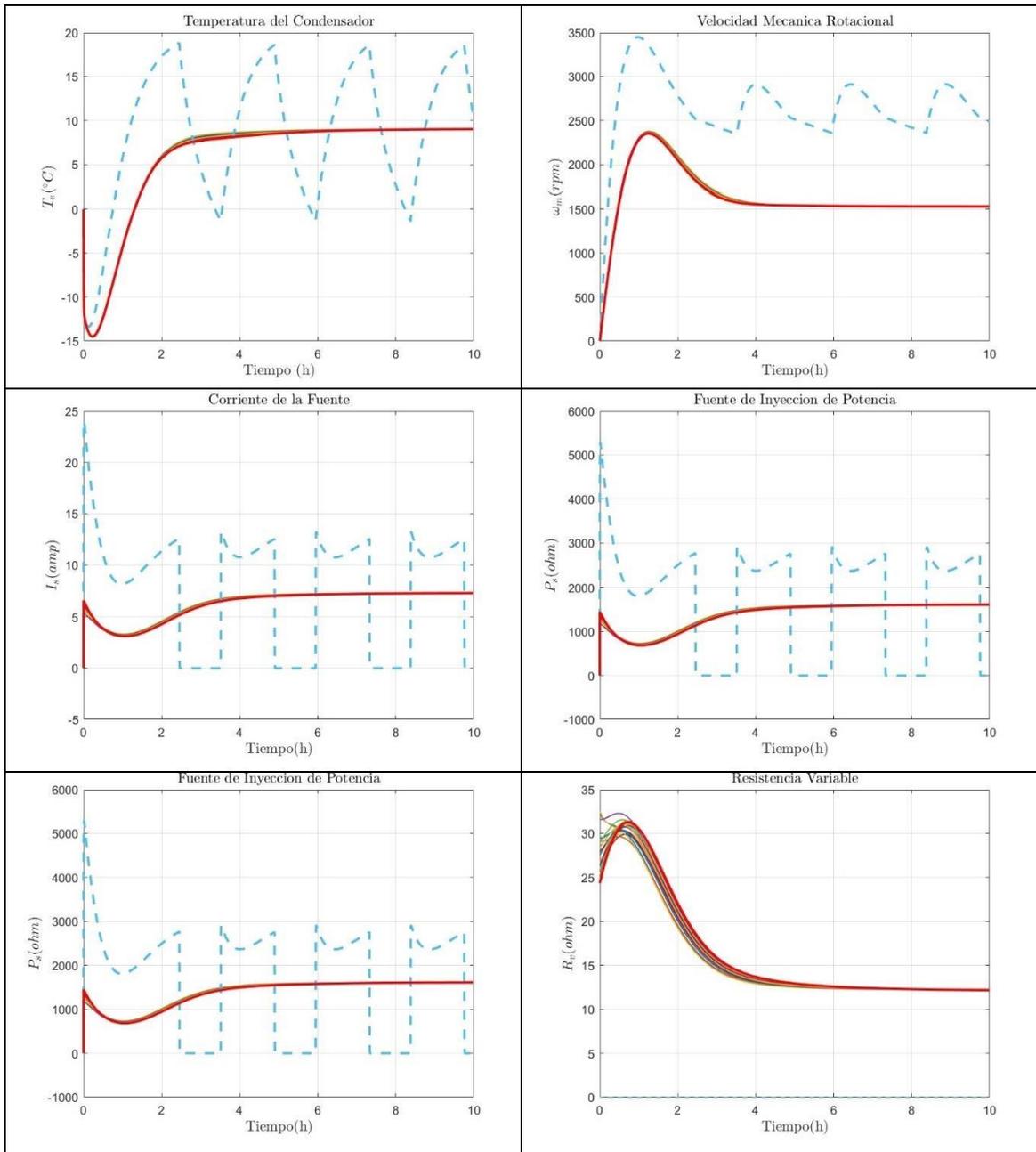
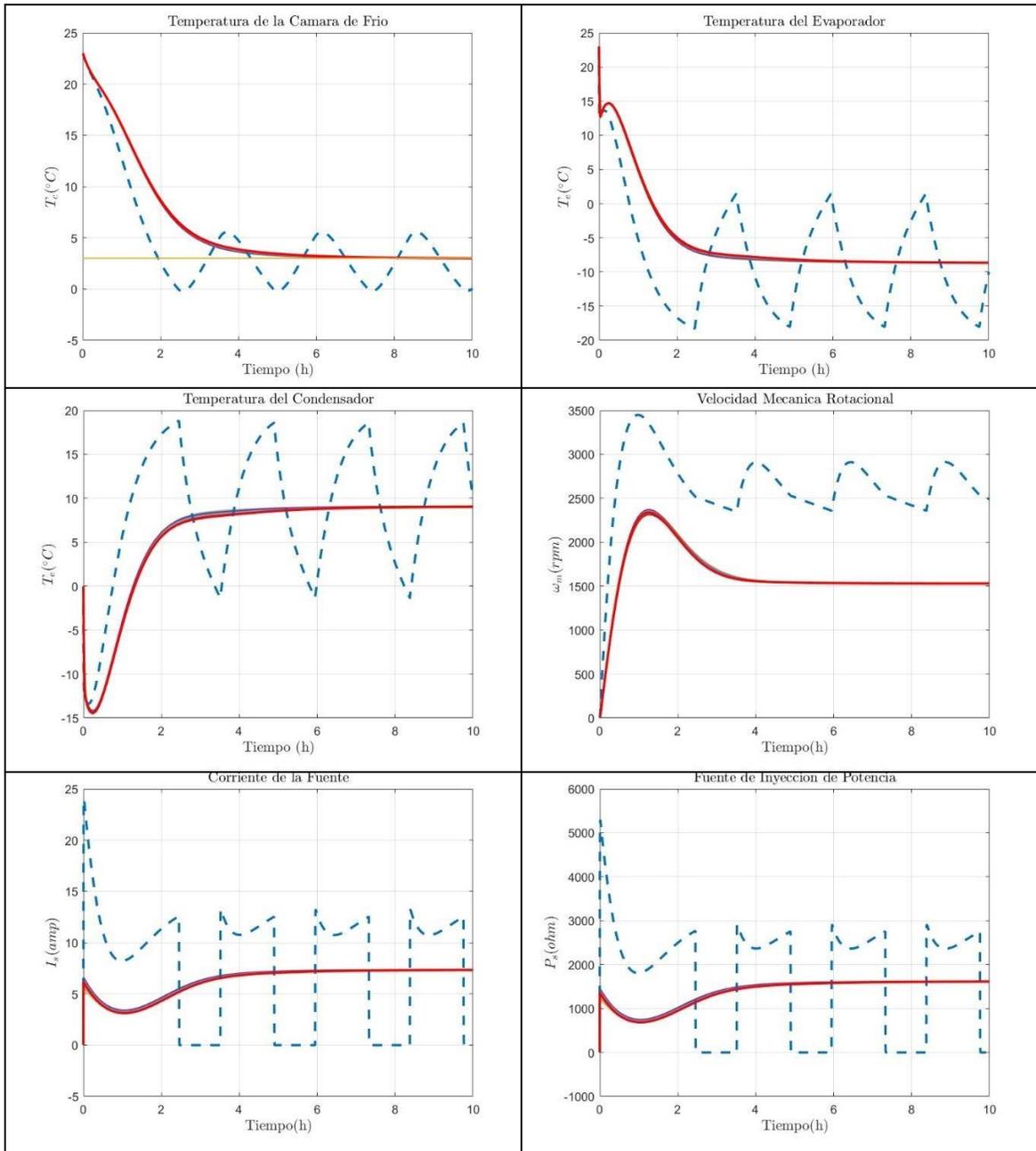


Figura 44: Comportamientos del sistema interviniendo el compresor en modo continuo con restricciones de estabilidad.

6.4 Intervención No. 4 en la velocidad del compresor y la apertura de la válvula de expansión. Control Continuo (MIMO)



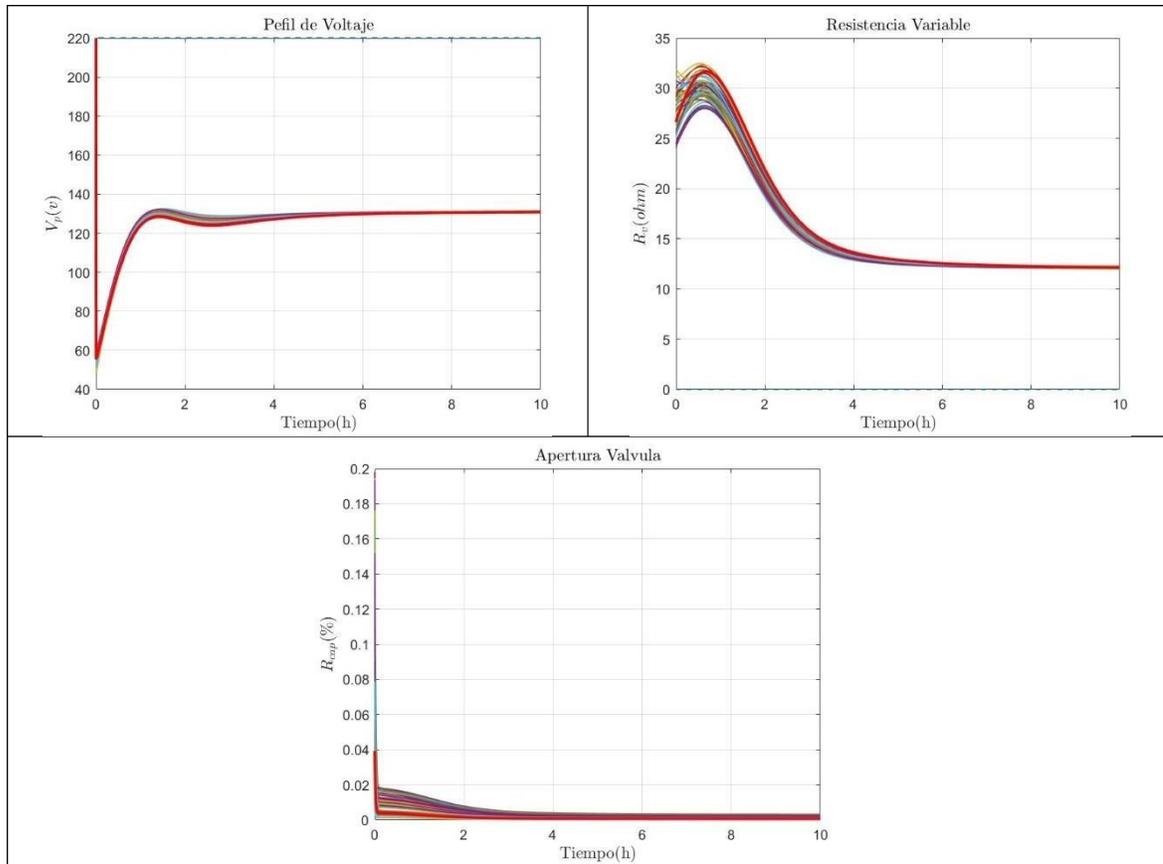


Figura 45: Comportamientos del sistema interviniendo el compresor y la válvula de expansión en modo continuo con restricciones de estabilidad.

Tabla 8: Consumo energético por tipo de intervención.

		Consumo de Energía	
	Condiciones Naturales	1.658377330533162e+04 J	
Estrategias Discretas			
	Estrategia de Intervención	Consumo de Energía	Parámetros del controlador
1.	Control On-Off (SISO Vc)	1.490574665443858e+04 Ahorro del 10%	K = -0.485930702529874 Ti = 8.792792200513793 Td = 7.537763920866476
2.	Control On-Off (MIMO Vc+Av)	1.521349451166387e+04 Ahorro del 9%	K1 = -0.415601801028771 Ti1 = 6.370384702531102 Td1 = 5.503789911585545 K2 = -7.642825539415643e-04 Ti2 = 9.745938227327613 Td2 = 8.346706121435121
Estrategias Continuas			
3.	Control Continuo (SISO Vc)	1.376909207583374e+04 Ahorro del 17%	K = -0.121715931759212 Ti = 0.310927632117318 Td = 4.945396971383088

4.	Control Continuo (MIMO Vc+Av)	1.377348093310132e+04 Ahorro del 17%	K1 = -0.133146784837464 Ti1 = 0.343669039946481 Td1 = 4.980746967335423 K2 = -1.957067479418406e04 Ti2 = 9.859466076684960 Td2 = 0.133363207999064
-----------	----------------------------------	--	---

7. Conclusiones y Recomendaciones

7.1 Conclusiones

- A través de los resultados obtenidos para el caso de estudio correspondiente a un sistema de refrigeración por compresión de vapor, se evidencia el cumplimiento de los objetivos de la propuesta de investigación, demostrando la efectividad de la estrategia en identificar oportunidades para la intensificación de la eficiencia energética de un sistema energético multidominio por intervención directa en su dinámica, manteniendo los objetivos de operación deseados sujeto a restricciones.
- La estrategia propuesta permite desarrollar desde una correspondencia física real del fenómeno energético; el reconocimiento, representación, intervención y análisis de sistemas multidominio, para la búsqueda de soluciones efectivas basadas en datos reales del comportamiento y consumo energético.
- La estrategia propuesta amplía significativamente las capacidades de análisis en los sistemas energéticos multidominio. El método de representación permite la descomposición del sistema en subsistemas más simples o complejos, facilitando el análisis de relaciones en diversas dimensiones y escalas según la información real disponible del sistema. A su vez el método de control basado en comportamiento permite la búsqueda de soluciones que garanticen las condiciones operativas deseadas, sujetas a la información real disponible del comportamiento de sistema y de los límites de operación de sus componentes internos.
- El uso del método de control basado en comportamiento tiene una ventaja significativa debido a su relación directa con el sistema real, independientemente de su representación o estructura de control, sujeto a diversas condiciones de operación, tanto de los componentes individuales como del sistema en su conjunto, en estado transitorio como estable. Así mismo se presenta como una herramienta autodirigida para la búsqueda de soluciones efectivas, eficientes y técnicamente viables a través del aprendizaje evolutivo de trayectorias. Esto la hace adecuada para emular condiciones físicas reales y adaptarse a cualquier esquema de control.
- El modelo unificado de un sistema multidominio desarrollado para el caso de estudio permite observar la dinámica y las interconexiones dentro del sistema de refrigeración por compresión de vapor. Esto incluye la observación del consumo de energía en diferentes puntos del sistema, proporcionando una visión holística del comportamiento del mismo. Este acercamiento permite la aplicación de la estrategia cuyo punto de partida era la observación del fenómeno real para la búsqueda de

soluciones, reflejando en buena medida, correspondencia física real con y sin intervención, en situaciones diversas (en reposo o sujeto a condiciones iniciales de operación) y permitiendo visualizar y analizar el comportamiento a través de estados transitorio y en estado estable de las variables que la conforman y del sistema como conjunto.

- La técnica selecta de representación con bases en los flujos de potencia para el modelado de sistemas energéticos multidominio como el SRCV facilita la integración de datos experimentales y teóricos. Permite simulaciones realistas y análisis de intervención a través de la interconexión de estructuras de control sin simplificar excesivamente el problema. Así mismo este enfoque proporciona una comprensión integral de la dinámica interna de un sistema energético multidominio, permitiendo la observación tanto de variables manifiestas como latentes, así como del consumo de energía en diferentes puntos del sistema.

7.2 Recomendaciones y trabajo futuro

- Abordar las altas variaciones en variables manipuladas para prevenir el deterioro potencial de componentes.
- Mejora y expansión de modelos y métodos que puedan manejar sistemas complejos acoplados, como los sistemas MIMO.
- Validar experimentalmente los resultados obtenidos en entornos industriales reales para verificar la eficacia y la aplicabilidad práctica de las soluciones propuestas.
- Explorar nuevas áreas de aplicación para la metodología desarrollada, buscando adaptarla a otros sistemas energéticos multidominio que presenten desafíos similares en términos de eficiencia energética y operación.

7.3 Bibliografía

- Ajitha, A. R., & Radhika, S. (2023). A Comprehensive Review of Demand Response Strategies and Role of Emergent Technologies for a Sustainable Home Energy Management Systems. *International Journal of Ambient Energy*, 1–55. <https://doi.org/10.1080/01430750.2023.2233522>
- Andrei Morch, Marialaura Di Somma, Christina Papadimitriou, Hanne Sæle, Valeria Palladino, Jesús Fraile Ardanuy, Giuseppe Conti, Mosè Rossi, & Gabriele Comodi. (2023). *Technologies enabling evolution of Integrated Local Energy Communities*. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.22133294>
- Arronategui, U., Bañares, J. Á., & Colom, J. M. (2023). A Framework to Support Decision-Making Based on AI and Simulation of Large-Scale Models. *Lecture Notes in Computer Science*, 148–152. https://doi.org/10.1007/978-3-031-29315-3_14
- Åström, K. J., Albertos, P., Blanke, M., Isidori, A., Schaufelberger, W., & Sanz, R. (2012). *Control of Complex Systems*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0349-3>
- Ayres, R. U. (2016). *Energy and Technology*. 231–253. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30545-5_8
- Azieva, R. K. (2023). *Impact of energy efficiency on activities of enterprise*. 2023(1), 28–35. <https://doi.org/10.24143/2073-5537-2023-1-28-35>
- Barbeito, I., Zaragoza, S., Tarrío-Saavedra, J., & Naya, S. (2017). Assessing thermal comfort and energy efficiency in buildings by statistical quality control for autocorrelated data. *Applied Energy*, 190, 1–17. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.100>
- Battle, C., & Doria-Cerezo, A. (2006). Energy-based modelling and simulation of the interconnection of a back-to-back converter and a doubly-fed induction machine. *2006 American Control Conference*, 6 pp. <http://doi.org/10.1109/ACC.2006.1656489>
- Bejarano, G. (2017). *Optimization and multivariable control of refrigeration systems*. Universidad de Sevilla.
- Bjørn H. Samset. (2016). *Energy and Climate: Vision for the Future*.
- Blenk, T., & Weindl, C. (2023). Fundamentals of State-Space Based Load Flow Calculation of Modern Energy Systems †. *Energies*, 16(13). <https://doi.org/10.3390/en16134872>
- Borutzky, W. (2011). *Bond Graph Modelling of Engineering Systems: Theory, Applications and Software Support*.

-
- Borutzky, W. (2016). Bond graphs for modelling, control and fault diagnosis of engineering systems. In *Bond Graphs for Modelling, Control and Fault Diagnosis of Engineering Systems, Second Edition*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-47434-2>
- Broenink, J. F. (1999). *Introduction to physical systems modelling with bond graphs*. http://www.menet.umn.edu/~lixxx099/ME8287_S11/BondGraphsV2.pdf
- Cavallaro, A., Gennaro, F. Di, Euzenat, J., Peters-Anders, J., & Osello, A. (2014). *Vision of energy systems for smart cities*. 35. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01180924/document>
- Chaudhary, P. K., & Dubey, D. S. P. (2016). Efficiency Optimization of Induction Motor Drive in Steady- State using Artificial Neural Network. *International Conference on Computation of Power*, 2, 295–302. <http://doi.org/10.1109/ICCPEIC.2016.7557246>
- Cheng, Q., Goh, B. W., & Kim, J. B. (2018). Internal Control and Operational Efficiency. *Contemporary Accounting Research*, 35(2), 1102–1139. <https://doi.org/10.1111/1911-3846.12409>
- Choudhary, P. K., & Choudhary, U. K. (2017). Efficiency optimization of pump motor drive at steady-state condition. *2017 {IEEE} {International} {Conference} on {Power}, {Control}, {Signals} and {Instrumentation} {Engineering} ({ICPCSI})*, 342–347. <https://doi.org/10.1109/ICPCSI.2017.8392312>
- Chuang, H.-C., Chan, C.-C., Weng, W.-B., & Lee, C.-T. (2018). Energy saving technique for natural stone cutting machine by constant speed control in stone industry. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 41(1), 61–68. <https://doi.org/10.1080/02533839.2017.1410450>
- Cicchella, A. (2023). Human Power Production and Energy Harvesting. *Encyclopedia*, 3(2), 698–704. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia3020050>
- Cichy, M., Kropiwnicki, J., & Kneba, Z. (2015). A Model of Thermal Energy Storage According to the Convention of Bond Graphs (Bg) and State Equations (Se). *Polish Maritime Research*, 22(4), 41–47. <https://doi.org/10.1515/pomr-2015-0069>
- Cinar, S., & Cimen, H. (2012). On the Investigation of the Energy Efficiency Using PID and Fuzzy Logic Controllers in a Marble Machine, 5(4), 73–80.
- Coelho, R. L. (2014). On the Concept of Energy: Eclecticism and Rationality. *Science Education*, 23(6), 1361–1380. <https://doi.org/10.1007/S11191-013-9634-1>
- Craig B. Smith, & Kelly E. Parmenter. (2016). *Energy Management Principles: Applications, Benefits, Savings* (second).

-
- Crespo, E. A., & Coutinho, J. A. P. (2022). *Insights into the Limitations of Parameter Transferability in Heteronuclear SAFT-type Equations of State*.
- Dubois, D. (1987). An application of fuzzy arithmetic to the optimization of industrial machining processes. *Mathematical Modelling*, 9(6), 461–475. [http://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90512-4](http://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90512-4)
- Dwyer, A. O. (2006). Reducing energy costs by optimizing controller tuning, 0–6.
- Dzyuba, A. P., Solovyeva, I., & Semikolenov, A. V. (2023). Raising the Resilience of Industrial Manufacturers through Implementing Natural Gas-Fired Distributed Energy Resource Systems with Demand Response. *Sustainability*, 15(10), 8241. <https://doi.org/10.3390/su15108241>
- Fong, B., Sobocinski, P., & Rapisarda, P. (2016). *A categorical approach to open and interconnected dynamical systems*. 495–504. <https://doi.org/10.1145/2933575.2934556>
- Frigo, G. (2017). Energy ethics, homogenization, and hegemony: A reflection on the traditional energy paradigm. *Energy Research and Social Science*, 30, 7–17. <https://doi.org/10.1016/J.ERSS.2017.06.030>
- Gavrilova, A. A., & Salov, A. (2019). *System Analysis and Modeling of the Infrastructure of Production Activities of Generating Companies*. <https://doi.org/10.1109/CSCMP45713.2019.8976680>
- Gavrilova, A. A., & Salov, A. G. (2020). *Systemic Analysis of Energy Systems in the New Economy*. <https://doi.org/10.1109/FAREASTCON50210.2020.9271638>
- Ghiaus, C. (1999). Fault diagnosis of air conditioning systems based on qualitative bond graph. *Energy and Buildings*. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(98\)00070-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7788(98)00070-X)
- Gillingham, K., Huang, P., Buehler, C., Peccia, J., & Gentner, D. R. (2021). The climate and health benefits from intensive building energy efficiency improvements. *Science Advances*, 7(34). <https://doi.org/10.1126/SCIADV.ABG0947>
- Gupta, J., & Chakraborty, M. (2021). *Energy efficiency in buildings*. 457–480. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822989-7.00016-0>
- Han, S., Keel, L. H., & Bhattacharyya, S. P. (2023). *Robust Decoupling, Disturbance Rejection and Linearization of Unknown Nonlinear Systems*. 606–618. https://doi.org/10.1007/978-3-031-28076-4_44

- Han, X. (2012). *Intelligent efficient engine and control method*.
- Haoye, S., Hongzhe, Q., & Guozheng, T. (2020). *Intelligent control system for high-efficiency aluminum electrolysis production*.
- Hasan, S., Zeyad, M. T., Ahmed, S. M. M., & Anubhove, Md. S. T. (2023). Optimization and planning of renewable energy sources based microgrid for a residential complex. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. <https://doi.org/10.1002/ep.14124>
- Hazi, A., Badea, A., Hazi, G., Necula, H., & Grigore, R. (2009). Increase of Paper Mill Energy Efficiency by Optimization Energy Supply System Industry. *Romania*, 1–5.
- He, W., & Huang, Y. (2021). Real-time Energy Optimization of Hybrid Electric Vehicle in Connected Environment Based on Deep Reinforcement Learning. *IFAC-PapersOnLine*, 54(10), 176–181. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.160>
- Hermes, C. J. L., & Melo, C. (2008). A first-principles simulation model for the start-up and cycling transients of household refrigerators. *International Journal of Refrigeration*, 31(8), 1341–1357. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2008.04.003>
- Hewitt, S. (2022a). *History of Energy*. 72–130. <https://doi.org/10.53478/tuba.978-625-8352-00-9.ch02>
- Hewitt, S. (2022b). *History of Energy*. 72–130. <https://doi.org/10.53478/tuba.978-625-8352-00-9.ch02>
- Holdren, J. P. (2007). Energy and Sustainability. *Science*, 315(5813), 737. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1139792>
- Hoyler, T. L. (2023). Intelligent energy management systems: a review. *Artificial Intelligence Review*. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10441-3>
- Hroncová, D., & Gmiterko, A. (2013). Bond Graphs of the Electrical RLC Circuit. *American Journal of Mechanical Engineering*, 1(7), 318–323. <https://doi.org/10.12691/AJME-1-7-33>
- Hu, X., Wang, H., & Tang, X. (2017). Cyber-physical control for energy-saving vehicle following with connectivity. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(11), 8578–8587. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2703673>
- Hybrid Physics and Data-Driven Method for Modeling and Analysis of Electricity–Heat Integrated Energy Systems. (2023). *IEEE Systems Journal*, 17(2), 2847–2857. <https://doi.org/10.1109/jsyst.2022.3213048>

Ibrahim Dincer, Marc A. Rosen, & Pouria Ahmadi. (2017). *Optimization of Energy Systems*.

Innocent, K., Leila, B., & Atieh, D. (2023). *Integrated Demand Response Programs in Energy Hubs: A Review of Applications, Classifications, Models and Future Directions*.
<https://doi.org/10.20944/preprints202305.1021.v1>

International Energy Agency, I. (2022). *Energy Efficiency 2022*. www.iea.org

Ishankhodjayevev, G., & Sultanov, M. (2022). *Development of Information Support for Decision-Making in Intelligent Energy Systems*. 1–5.
<https://doi.org/10.1109/ICISCT55600.2022.10146931>

Jahangeer, K. A., Tay, A. A. O., & Raisul Islam, M. (2011). Numerical investigation of transfer coefficients of an evaporatively-cooled condenser. *Applied Thermal Engineering*, 31(10), 1655–1663. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.02.007>

Jia, S. Q., Xu, J. J., Pan, Y., Tian, L., & Gu, R. (2022). Operation optimization study of integrated energy system based on multi-energy complementary. *Journal of Physics: Conference Series*, 2237(1), 12031. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2237/1/012031>

Jing, R., Ani, V., & Bone, J. (2023). *Integrated energy system*. 165–176.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821204-2.00138-0>

Jordan, M., Corry, J., & Jaques, I. (2017). *Energy efficiency : a key enabler for energy access*. 1–13.

Junsheng, L. (2016). *Intelligent energy efficiency optimizing control system for central air conditioning system and control method of intelligent energy efficiency optimizing control system*.

Kaya, A. (2022). Queue models Evaluation of Simulation for Managerial Decision Support Systems: Application of Two-Stage Production Control. *İzmir Sosyal Bilimler Dergisi*, 4(2), 89–96. <https://doi.org/10.47899/ijss.1193183>

Kiptoo, M. K., Adewuyi, O. B., Howlader, H. O. R., Nakadomari, A., & Senjyu, T. (2023). Optimal Capacity and Operational Planning for Renewable Energy-Based Microgrid Considering Different Demand-Side Management Strategies. *Energies*, 16(10), 4147. <https://doi.org/10.3390/en16104147>

Koshti, A. M. (2023). *Transfer function models and sensitivity analysis*. 12488, 124880T-124880T. <https://doi.org/10.1117/12.2652138>

Koskinen, K. U. (2013). *Systemic View and Systems Thinking*. 13–30.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-00104-3_3

-
- Kypuros, J. A. (2013). *System dynamics and control with bond graph modeling*. <https://doi.org/10.1201/b14676>
- L Pei, L., ML, M., & XW, X. W. (2023). *Integrated Energy Systems towards Carbon Neutrality*. <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-6804-1>
- Laimon, M., Yusaf, T., Mai, T., Goh, S., & Alrefae, W. (2022). A systems thinking approach to address sustainability challenges to the energy sector. *International Journal of Thermofluids*, 15, 100161. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100161>
- Lawrence E. Jones. (2017). *Renewable Energy Integration Practical Management of Variability, Uncertainty, and Flexibility in Power Grids*.
- Lin, Y. (1999). *General Systems Theory: A Mathematical Approach*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/b116863>
- Lobontiu, N. (2018). *Chapter 7 - Transfer Function Approach*. 323–378. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804559-6.00007-5>
- Lopes, M. B., Antunes, C. H., & Martins, N. (2015). Towards more effective behavioural energy policy: An integrative modelling approach to residential energy consumption in Europe. *Energy Research and Social Science*, 7, 84–98. <https://doi.org/10.1016/J.ERSS.2015.03.004>
- Maheedhar, T. D. (2023). *Advanced Technologies in Integrated Energy Systems*. 105–117. <https://doi.org/10.1002/9781119847564.ch8>
- Makarov, A. (2022). Energy of the “Damned Side of Things.” *Logos et Praxis*, 3, 89–94. <https://doi.org/10.15688/lp.jvolstu.2022.3.10>
- Marine, C. (2020). Energy efficiency, the overlooked climate emergency solution. *Economic Policy*, 15(2), 48–67.
- Mashrur Chowdhury, Amy Apon, & Kakan Dey. (2017). *Data Analytics for Intelligent Transportation Systems*.
- Moezzi, M., & Lutzenhiser, L. (2020). *Beyond energy behaviour: A broader way to see people for climate change technology planning*. 89–106. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818567-4.00003-X>
- Neil A. Duffie. (2022). *Control Theory Applications for Dynamic Production Systems: Time and Frequency Methods for Analysis and Design*. Wiley.

-
- Peña, M., Biscarri, F., Personal, E., & León, C. W. A. (2022). Decision Support System to Classify and Optimize the Energy Efficiency in Smart Buildings: A Data Analytics Approach. *Sensors*, 22(4), 1380. <https://doi.org/10.3390/s22041380>
- Pillai, H. K., Shankar, S., Pillai, H. K., & Shankar, S. (1999). A Behavioral Approach to Control of Distributed Systems. *Siam Journal on Control and Optimization*. <https://doi.org/10.1137/s0363012997321784>
- Pothitou, M. (2015). *Linking energy behaviour, attitude and habits, and social practices with environmental predisposition and knowledge: what are the factors with influence on environmental behaviour?*
- Pothitou, M., Kolios, A., Varga, L., & Gu, S. (2016). A framework for targeting household energy savings through habitual behavioural change. *International Journal of Sustainable Energy*, 35(7), 686–700. <https://doi.org/10.1080/14786451.2014.936867>
- Qin, C., Zhao, J., & Wang, W. (2023). Hybrid Physics and Data-Driven Method for Modeling and Analysis of Electricity–Heat Integrated Energy Systems. *IEEE Systems Journal*, 17, 2847–2857. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2022.3213048>
- Rane, D., Sharma, S., & Verma, A. (2022). *Multi-Objective Building Energy Management for Integrated Energy Systems Considering Greenhouse Gas Emissions*. 530–535. <https://doi.org/10.1109/NPSC57038.2022.10068981>
- Rosen, M. A., & Farsi, A. (2022). *Sustainability and sustainable energy*. 107–132. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-99872-7.00007-3>
- Sass, L. L. (2004). Symbolic modeling of electromechanical multibody, (January 2004). Retrieved from <http://edoc.bib.ucl.ac.be:81/ETD-db/collection/available/BeInUcetd-0102004-172924/>
- Schné, T., Jaskó, S., & Simon, G. (2015). Dynamic models of a home refrigerator. *MACRo 2015-5th International Conference on Recent Achievements in Mechatronics, Automation, Computer Science and Robotics*, 105–114. <https://doi.org/10.1515/macro-2015-0010>
- Schné, T., Jaskó, S., & Simon, G. (2018). Embeddable adaptive model predictive refrigerator control for cost-efficient and sustainable operation. *Journal of Cleaner Production*, 190, 496–507. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.137>
- Seleem, M. S. (2023). *Energy Transition: Changing the Brazilian Landscape Over Time*. 1–15. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21033-4_1

-
- Selva, J. A. N. (2010). A systemic vision of belief systems and ideologies. *ViXra*.
https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/24798/1/Tesis_Nescolarde.pdf
- Sellami, A., Aridhi, E., Mzoughi, D., & Mami, A. (2018). *Performance of the bond graph approach for the detection and localization of faults of a refrigerator compartment containing an ice quantity*. <https://doi.org/10.1142/S2010132518500281>
- Serale, G., Fiorentini, M., Capozzoli, A., Bernardini, D., & Bemporad, A. (2018). Model predictive control (MPC) for enhancing building and HVAC system energy efficiency: problem formulation, applications and opportunities. *Energies*, 11(3).
<https://doi.org/10.3390/en11030631>
- Shaikh, P. H., Nor, N. B. M., Nallagownden, P., Elamvazuthi, I., & Ibrahim, T. (2016). Intelligent multi-objective control and management for smart energy efficient buildings. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 74, 403–409.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.08.006>
- Shin, S.-J., Woo, J., & Rachuri, S. (2017). Energy efficiency of milling machining: {Component} modeling and online optimization of cutting parameters. *Journal of Cleaner Production*, 161, 12–29. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.013>
- Sievers, J., & Blank, T. (2023). A Systematic Literature Review on Data-Driven Residential and Industrial Energy Management Systems. *Energies*, 16(4), 1688.
<https://doi.org/10.3390/en16041688>
- Soto., G. J. A., & Hernandez-Riveros., J.-A. (2019). *Evolutionary split range controller for a refrigeration system*. <https://doi.org/10.5220/0007930803410351>
- Soto, G. J. A., López, J. M. G., & Hernández-Riveros, J. A. (2018). *Coupled evolutionary tuning of PID controllers for the benchmark on vapor compression refrigeration*. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.06.146>
- Stuart Borlase. (2013). *Smart Grids: Infrastructure, Technology, and Solutions"* .
- Sundqvist, J.-O., Baky, A., Björklund, A., Carlsson, M., Eriksson, O., Frostell, B., Granath, J., & Thyselius, L. (1999). *Systemanalys av energiutnyttjande från avfall - utvärdering av energi, miljö och ekonomi : Översiktsrapport*.
- Surana, K., Chikkatur, A. P., & Sagar, A. D. (2013). *Technology Innovation and Energy*. 27–43.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09059-X>

-
- Tian, H., Wang, K., Cui, X.-F., Chen, Z., & Zhao, E. (2023). Multi-objective planning of microgrid based on renewable energy sources and energy storage system. *Journal of Energy Storage*, 68, 107803. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107803>
- Trentelman, H. L., & Willems, J. C. (2003). *The behavioral approach as a paradigm for modeling interconnected systems*. 9, 296–306. <https://doi.org/10.3166/EJC.9.296-306>
- Ullah, Z., Wang, S. R., Elkadeem, M. R., & Kotb, K. M. (2023). *Optimal Capacity Planning and Analysis of a Sustainable Solar/Wind Microgrid in Rural Areas*. 299–303. <https://doi.org/10.1109/GreenTech56823.2023.10173808>
- Uparikar, Miss. U. A., & Jumale, N. V. (2020). Review on supercapacitor and battery power management in electric vehicle application. *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education*, 6(2), 1645–1649.
- van Schoor, G., Uren, K. R., van Wyk, M. A., van Vuuren, P. A., & du Rand, C. P. (2014). An energy perspective on modelling, supervision, and control of large-scale industrial systems: {Survey} and framework. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3), 6692–6703. <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.02190>
- Vinatier, I. (2022). *Analysis of Transfer Function Models*. 17–24. <https://doi.org/10.1201/9781003336891-2>
- Wang, B., & Wang, S. (2003). Parameter optimization in complex industrial process control based on improved fuzzy-GA. *Machine Learning and ...*, (November), 2–5. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1259936
- Wangsupphaphol, A., Phichaisawat, S., Idris, N. R. N., Jusoh, A., & Muhamad, N. D. (2023). A Systematic Review of Energy Management Systems for Battery/Supercapacitor Electric Vehicle Applications. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su151411200>
- Wellstead, P., & Cloutier, M. (2011). An energy systems approach to Parkinson's disease. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Systems Biology and Medicine*, 3(1), 1–6. <https://doi.org/10.1002/WSBM.107>
- Willems, J. C. (1997). On interconnections, control, and feedback. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 42(3), 326–339. <https://doi.org/10.1109/9.557576>
- Willems, J. C. (2007a). The Behavioral Approach to Open and Interconnected Systems. *IEEE Control Systems*, 27(6), 46–99. <https://doi.org/10.1109/MCS.2007.906923>
- Willems, J. C. (2007b). The Behavioral Approach to Open and Interconnected Systems. *IEEE Control Systems Magazine*, 27(6), 46–99. <https://doi.org/10.1109/MCS.2007.906923>

-
- Xia, X., & Zhang, L. (2016). Industrial energy systems in view of energy efficiency and operation control. *Annual Reviews in Control*, 0, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2016.09.009>
- Yan, Y., Bao, J., & Huang, B. (2021a). *Behavioural Approach to Distributed Control of Interconnected Systems*. <http://arxiv.org/abs/2103.10063>
- Yan, Y., Bao, J., & Huang, B. (2021b). *Behavioural Approach to Distributed Control of Interconnected Systems*. <http://arxiv.org/pdf/2103.10063.pdf>
- Yu, W. Y., Patros, P., Young, B., Klinac, E., & Walmsley, T. G. (2022). Energy digital twin technology for industrial energy management: Classification, challenges and future. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 161, 112407. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112407>
- Zhang, R., Wu, S., Lu, R., & Gao, F. (2014). Predictive control optimization based PID control for temperature in an industrial surfactant reactor. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 135, 48–62. <http://doi.org/10.1016/j.chemolab.2014.03.021>
- Zhang, S., Hu, X., He, X., Tang, S., & Zhang, D. (2023). Dynamic coupling across energy forms and hybrid simulation of the multi-energy system. *Frontiers in Energy Research*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1209845>
- Zhao, A., Ma, J., Zhou, X., Cong, L., Bai, B., Zeng, M., & Zhang, X. (2021). *The Optimal Operation Model of Electric-Thermal-Gas Integrated Energy System Considering Multi-Energy Complementarity*. 781(4), 042021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/781/4/042021>
- Ziyou Song. (2022). *Battery/Supercapacitor hybrid energy storage system in vehicle applications*. 165–192. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102888-9.00007-0>
- Zubidi, A. N., Ismail, B., Hamrouni, I. M. A. Al, Rahman, N. H. A., & Rozlan, M. H. H. M. (2023). The Impact of Integrating Multi-Microgrid System with FACTS Devices for Voltage Profile Enhancement and Real Power Loss Reduction in Power System: A Review. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 31(2), 633–653. <https://doi.org/10.47836/pjst.31.2.01>