

**Especialización en Gestión de la Energía
FIQ - UNL**

Desarrollo de un Sistema Integral de Gestión para el Uso Eficiente de la Energía en la Industria. Análisis del Rol del Estado.

Ing. Hugo José del Rey

Directora: Dra. María Eugenia Lovato

Codirectora: Dra. Debora Laura Manuale

Trabajo Final Integrador

Presentado para la obtención del título de
Especialista en Gestión de la Energía

Diciembre 2025

Resumen

Este Trabajo Final Integrador desarrolla un Sistema Integral de Gestión de la Energía (SIGE) de carácter universal, basado en la norma ISO 50001:2018, demostrando su aplicabilidad tanto en el sector industrial como en el sector edilicio. El sistema fue validado mediante su implementación en dos casos de estudio representativos: un proceso de pasteurización HTST en la industria láctea y un edificio de oficinas de mediana envergadura.

La metodología empleada combinó el diseño de un esquema genérico de gestión energética con su aplicación práctica, complementado con un análisis crítico del rol del Estado como facilitador esencial. Se utilizó el marco teórico de la teoría de juegos para comprender las dinámicas de mercado que inhiben la adopción espontánea de prácticas de eficiencia energética, complementado con una evaluación exhaustiva de la evolución de las políticas públicas en Argentina durante la última década.

Los resultados confirman la versatilidad del SIGE desarrollado, que demostró adaptabilidad a contextos energéticos diversos mediante la normalización de indicadores específicos para cada caso. Simultáneamente, se identificó la necesidad crítica de políticas estatales estables y consistentes que superen las barreras del mercado y promuevan la transición hacia un desarrollo económico sustentable. El trabajo concluye proponiendo líneas de acción concretas para la implementación práctica del sistema y recomendaciones de política pública. En este sentido, el SIGE propuesto permite estructurar decisiones de eficiencia energética aun en contextos de precios distorsionados y alta incertidumbre regulatoria.

Palabras clave: eficiencia energética, sistema de gestión energética, ISO 50001, política pública, teoría de juegos, sostenibilidad, gestión industrial.

Agradecimientos

Agradezco a mis directoras, Eugenia y Debora, por su guía experta y apoyo constante durante todo el proceso; a la FIQ-UNL y al programa de Especialización, por la formación brindada; y a las organizaciones que facilitaron los datos para los casos de estudio, haciendo posible la aplicación práctica de este trabajo.

Mi gratitud más profunda a mi pareja, por su paciencia y aliento en cada etapa; a mis hijas, mi mayor motivación e inspiración; y a mi madre, por su apoyo inquebrantable.

Índice general

Resumen	3
Agradecimientos	5
Lista de Tablas	11
1. Introducción	13
1.1. Contexto Global y Problemática Energética	13
1.2. Planteamiento del Problema	13
1.3. Justificación y Relevancia	14
1.4. Objetivos	14
1.4.1. Objetivo General	14
1.4.2. Objetivos Específicos	14
1.5. Alcances y Limitaciones	15
1.6. Estructura del Documento	15
2. Marco Teórico y Estado del Arte	17
2.1. Sistemas de Gestión de la Energía (SGEn)	17
2.1.1. La Norma ISO 50001:2018 y el Ciclo PHVA	17
2.2. Herramientas de Ingeniería para la Eficiencia Energética	18
2.2.1. Herramientas de Diagnóstico y Monitoreo	18
2.2.2. Herramientas de Análisis y Modelado	18
2.2.3. Indicadores de Desempeño Energético (IDEn)	18
2.3. Teoría de juegos y su Aplicación a la Eficiencia Energética	19
2.3.1. El Problema del Equilibrio Ineficiente	19
2.3.2. Barreras a la Eficiencia Energética	20
2.4. El Rol del Estado y las Políticas Públicas	20
2.4.1. Instrumentos Regulatorios	20
2.4.2. Instrumentos Económicos	21
2.4.3. Instrumentos de Información y Capacitación	21
2.5. Estado del Arte en Sistemas de Gestión Energética	21

3. Materiales y Métodos	23
3.1. Enfoque Metodológico General	23
3.2. Diseño del Sistema Integral de Gestión de la Energía (SIGE) Base	23
3.2.1. Principios de Diseño	23
3.2.2. Componentes del SIGE Base	24
3.3. Selección y Caracterización de Casos de Estudio	26
3.3.1. Caso 1: Proceso de Pasteurización HTST en Industria Láctea	26
3.3.2. Caso 2: Edificio de Oficinas de Mediana Envergadura	26
3.4. Metodología de Aplicación del SIGE	27
3.4.1. Paso 1: Contextualización	27
3.4.2. Paso 2: Revisión Energética	27
3.4.3. Paso 3: Identificación de Oportunidades	27
3.4.4. Paso 4: Planificación de Acciones	28
3.4.5. Paso 5: Diseño de Monitoreo	28
3.5. Metodología para el Análisis del Rol del Estado	28
3.5.1. Análisis Documental	28
3.5.2. Análisis de Teoría de Juegos	28
3.5.3. Evaluación de Brechas	28
3.6. Herramientas de Análisis Utilizadas	28
4. Resultados y Discusión	31
4.1. Aplicación y Resultados - Caso 1: Proceso de Pasteurización HTST en Industria Láctea	31
4.1.1. Revisión Energética y Establecimiento de la Línea Base	31
4.1.2. Oportunidades de Mejora Identificadas	32
4.1.3. Adaptación del SIGE Base al Proceso de Pasteurización	33
4.1.4. Discusión de Resultados - Caso 1	33
4.2. Aplicación y Resultados - Caso 2: Edificio de Oficinas de Mediana Envergadura	34
4.2.1. Revisión Energética y Establecimiento de la Línea Base	34
4.2.2. Oportunidades de Mejora Identificadas	35
4.2.3. Adaptación del SIGE Base al Edificio de Oficinas	36
4.2.4. Discusión de Resultados - Caso 2	36
4.3. Análisis Comparativo y Discusión de la Versatilidad del SIGE	36
4.3.1. Discusión de la Versatilidad	37
4.4. Resultados del Análisis del Rol del Estado	38
4.4.1. Análisis Crítico del Marco Teórico: Teoría de Juegos Aplicada	38

4.4.2. Evolución de las Políticas Públicas en Argentina (2013-2023)	39
4.4.3. Discusión Integradora: El SIGE, la Teoría de Juegos y la Política Pública	39
5. Conclusiones y Trabajos Futuros	41
5.1. Conclusiones Principales	41
5.1.1. Respecto al Sistema Integral de Gestión de la Energía	41
5.1.2. Respecto al Análisis del Rol del Estado	42
5.1.3. Contribuciones del Trabajo	42
5.2. Limitaciones del Estudio	43
5.3. Trabajos Futuros	43
5.4. Reflexión Final	44
Bibliografía	47
A. Anexos	49
A.1. Anexo A: Procedimiento Completo del SIGE Desarrollado	49
A.1.1. Política Energética (Modelo Genérico)	49
A.1.2. Formatos de Registro	50
A.2. Anexo B: Factores de Emisión Utilizados	50
A.2.1. Metodología de Cálculo	50
A.2.2. Factores de Emisión Aplicados	51
A.3. Anexo C: Fichas Técnicas de las Oportunidades de Mejora	51
A.3.1. OM-1: Recuperador de Calor en Pasteurizador	51
A.3.2. OM-4: Recambio a Iluminación LED	51
A.4. Anexo D: Tablas de Datos de Consumo	52
A.5. Anexo E: Ejemplo Numérico Simplificado de Equilibrio de Nash	53

Índice de cuadros

4.1. Revisión Energética - Caso Pasteurización Láctea	31
4.2. Oportunidades de Mejora - Caso Pasteurización Láctea	32
4.3. Revisión Energética - Caso Edificio de Oficinas	34
4.4. Oportunidades de Mejora - Caso Edificio de Oficinas	35
4.5. Análisis Comparativo de la Aplicación del SIGE Base	37
A.1. Registro de Revisión Energética	50
A.2. Ficha de Oportunidad de Mejora	50
A.3. Factores de Emisión Aplicados	51
A.4. Consumos Energéticos Mensuales - Caso Pasteurización	52
A.5. Consumos Eléctricos Mensuales - Caso Edificio	52
A.6. Matriz de pagos ilustrativa (Empresa A, Empresa B)	53

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto Global y Problemática Energética

En el escenario energético contemporáneo, caracterizado por la volatilidad de precios, la seguridad de suministro y la urgencia climática, la eficiencia energética emerge como una estrategia fundamental para abordar desafíos multidimensionales. Según la Agencia Internacional de Energía (2020), las medidas de eficiencia energética podrían contribuir con más del 40 % de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero necesaria para alcanzar los objetivos climáticos globales. Esta relevancia se acentúa en economías emergentes como la Argentina, donde la intensidad energética del PIB supera en un 30 % el promedio de la OCDE, indicando significativas oportunidades de mejora.

La problemática se manifiesta particularmente en el sector industrial, responsable de aproximadamente el 35 % del consumo energético final a nivel global. En Argentina, según datos del Ministerio de Energía (2023), la industria consume el 28 % de la energía total, con procesos intensivos en energía como los de las industrias alimenticia, química y siderúrgica representando los mayores potenciales de optimización. Paralelamente, el sector edilicio contribuye con el 21 % del consumo, donde sistemas de climatización, iluminación y equipamientos representan áreas críticas para la gestión energética.

1.2. Planteamiento del Problema

La ineficiencia en el uso de la energía constituye un problema estructural con múltiples dimensiones. Técnicamente, se manifiesta en equipos obsoletos, pérdidas térmicas y eléctricas, y falta de instrumentación para el monitoreo. Económicamente, representa costos operativos innecesarios y pérdida de competitividad internacional. Ambientalmente, se traduce en emisiones superfluas de gases de efecto invernadero y mayor presión sobre los recursos naturales.

Sin embargo, la raíz del problema trasciende lo técnico-económico para adentrarse en lo organizacional y lo institucional. La ausencia de sistemas de gestión estructurados impide la identificación sistemática de oportunidades y la implementación continua de mejoras. Simultáneamente, las fallas de mercado documentadas por la literatura económica —como

las externalidades, las asimetrías de información y las barreras de capital— demandan una respuesta institucional y técnica coordinada. Ante este escenario, el presente trabajo se propone abordar dicha problemática mediante el desarrollo del SIGE y un análisis crítico del rol del Estado, buscando transformar estos obstáculos estructurales en oportunidades estratégicas para la mejora del desempeño energético.

1.3. Justificación y Relevancia

Este trabajo se justifica por la necesidad de desarrollar herramientas prácticas que permitan a las organizaciones transitar hacia una gestión profesional de la energía. La elaboración de un Sistema Integral de Gestión de la Energía (SIGE) versátil responde a esta necesidad, proporcionando un modelo adaptable a diferentes contextos operativos.

La relevancia académica reside en la integración de perspectivas técnicas y de políticas públicas, abordando tanto la metodología de gestión interna de la energía en las organizaciones como las razones por las cuales los mercados no adoptan espontáneamente estas prácticas. La aplicación del marco de la teoría de juegos a la eficiencia energética en el contexto argentino representa una contribución original al análisis de políticas energéticas.

Profesionalmente, el trabajo proporciona a los gestores energéticos una herramienta concreta para implementar sistemas de gestión, mientras que para los diseñadores de políticas ofrece perspectivas sobre los instrumentos más efectivos para promover la eficiencia energética.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Desarrollar y validar un Sistema Integral de Gestión de la Energía (SIGE) de carácter universal, analizando su aplicabilidad en diferentes contextos energéticos y evaluando el rol del Estado como facilitador de su implementación masiva.

1.4.2. Objetivos Específicos

1. Diseñar un SIGE base alineado con la norma ISO 50001:2018, incorporando mejores prácticas de gestión energética y criterios de adaptabilidad sectorial.
2. Aplicar el SIGE base a un proceso industrial intensivo en energía (pasteurización HTST en industria láctea), cuantificando su desempeño energético inicial e identificando oportunidades de mejora técnico-económicas.
3. Validar la versatilidad del SIGE mediante su aplicación a un contexto no industrial (edificio de oficinas), demostrando su adaptabilidad a diferentes perfiles de consumo

y estructuras organizacionales.

4. Analizar las dinámicas de mercado que inhiben la adopción de eficiencia energética utilizando el marco de la teoría de juegos, con base en el trabajo de Camarda (2018).
5. Evaluar críticamente la evolución de las políticas públicas de eficiencia energética en Argentina durante el período 2013-2023, identificando aciertos, limitaciones y oportunidades de mejora.
6. Elaborar recomendaciones técnicas y de política pública que faciliten la implementación masiva de sistemas de gestión energética en el país.

1.5. Alcances y Limitaciones

El presente trabajo se enfoca en el desarrollo de un marco de trabajo de gestión y su validación conceptual mediante casos de estudio. Sus alcances son los siguientes:

- Diseño de documentación base del sistema de gestión (políticas, procedimientos, registros).
- Análisis energético de dos casos representativos de diferentes sectores.
- Evaluación del marco regulatorio e instrumentos de política pública.
- Elaboración de recomendaciones de implementación.

Las limitaciones reconocidas son las siguientes:

- Los análisis cuantitativos se basan en datos modelados y estimaciones técnicas, no en mediciones en tiempo real de instalaciones específicas. Esta decisión se justifica por restricciones de acceso a instrumentación, disponibilidad de series históricas detalladas y confidencialidad operativa, aspectos frecuentes en estudios aplicados a organizaciones reales.
- La validación práctica requiere implementación piloto, la cual excede el alcance de este trabajo académico.
- El análisis económico de oportunidades de mejora es preliminar y requiere estudios de ingeniería más detallados para su implementación.

1.6. Estructura del Documento

El trabajo se organiza en cinco capítulos principales. El Capítulo 2 presenta el marco teórico, revisando literatura sobre sistemas de gestión, herramientas de eficiencia energética y políticas públicas. El Capítulo 3 detalla la metodología empleada para el diseño del SIGE y su aplicación. El Capítulo 4 presenta los resultados obtenidos y su discusión. Finalmente, el Capítulo 5 sintetiza las conclusiones y propone trabajos futuros.

Capítulo 2

Marco Teórico y Estado del Arte

2.1. Sistemas de Gestión de la Energía (SGEn)

Los Sistemas de Gestión de la Energía (SGEn) constituyen estructuras organizativas que permiten a las empresas establecer procesos sistemáticos para mejorar continuamente su desempeño energético. Según la definición de la norma ISO 50001:2018, un SGEn es el 'conjunto de elementos interrelacionados o interactivos para establecer una política y objetivos energéticos, y los procesos y procedimientos para alcanzar dichos objetivos' (ISO, 2018).

La evolución de los SGEn puede trazarse desde las primeras prácticas ad-hoc de conservación de energía en la crisis petrolera de los años 70, hasta los sistemas estructurados contemporáneos. Kaplan y Reed (2010) identifican tres generaciones de gestión energética: (1) enfoque reactivo centrado en equipos individuales, (2) enfoque departamental con auditorías energéticas, y (3) enfoque sistémico integrado a la gestión general de la organización.

2.1.1. La Norma ISO 50001:2018 y el Ciclo PHVA

La norma ISO 50001:2018 establece los requisitos para implementar, mantener y mejorar un SGEn. Su estructura se basa en el ciclo de mejora continua Planificar-Hacer-Verificar-Actuar (PHVA), adaptado específicamente para la gestión de la energía:

Planificar (Plan): Esta fase incluye la comprensión del contexto organizacional, el establecimiento del alcance del sistema, el liderazgo y compromiso de la dirección, la planificación de acciones para abordar riesgos y oportunidades, y el establecimiento de objetivos energéticos. La **revisión energética** es el núcleo de esta fase, comprendiendo:

- Análisis de usos y consumos energéticos.
- Identificación de áreas de consumo significativo de energía (SEUs).
- Establecimiento de la línea de base energética.
- Desarrollo de indicadores de desempeño energético (IDEn).

Hacer (Do): Comprende la implementación de los procesos planificados, incluyendo competencias, concienciación, comunicación, documentación, control operacional y pre-

paración para respuesta a emergencias.

Verificar (Check): Incluye el monitoreo, medición, análisis y evaluación del desempeño energético, la evaluación del cumplimiento legal, las auditorías internas y la revisión por la dirección.

Actuar (Act): Aborda las acciones para tratar las no conformidades y implementar mejoras continuas en el SGEEn.

2.2. Herramientas de Ingeniería para la Eficiencia Energética

La implementación efectiva de un SGEEn requiere del apoyo de diversas herramientas técnicas de análisis energético. Campos (2007) clasifica estas herramientas en cuatro categorías principales:

2.2.1. Herramientas de Diagnóstico y Monitoreo

- **Auditorías Energéticas:** Procesos sistemáticos para obtener un conocimiento adecuado del perfil de consumo energético de una instalación, identificar y cuantificar flujos de energía, y recomendar oportunidades de ahorro costo-efectivas.
- **Sistemas de Medición y Verificación (M&V):** Protocolos para cuantificar ahorros energéticos resultantes de implementar medidas de eficiencia, siguiendo estándares como el IPMVP (International Performance Measurement and Verification Protocol).
- **Instrumentación y Sistemas SCADA:** Equipos y software para monitoreo en tiempo real de parámetros energéticos críticos.

2.2.2. Herramientas de Análisis y Modelado

- **Análisis Termoeconómico:** Metodologías como el análisis exergético que permiten evaluar simultáneamente aspectos energéticos y económicos de sistemas térmicos.
- **Modelado de Sistemas Energéticos:** Herramientas computacionales para simular el comportamiento de sistemas energéticos bajo diferentes condiciones operativas.
- **Análisis de Pérdidas Técnicas:** Metodologías para cuantificar y localizar pérdidas en sistemas eléctricos, térmicos y mecánicos.

2.2.3. Indicadores de Desempeño Energético (IDEn)

Los IDEn son métricas cuantitativas que permiten evaluar el desempeño energético. La norma ISO 50006:2014 proporciona directrices para su selección y uso. Se clasifican

en:

- **IDEn absolutos:** Consumo energético total (kWh, GJ).
- **IDEn relativos o normalizados:** Consumo por unidad de producto (kWh/unidad), por superficie (kWh/m²), o corregidos por condiciones operativas.
- **IDEn de eficiencia:** Relaciones entre energía útil y energía entrada (COP, eficiencia térmica).

2.3. Teoría de juegos y su Aplicación a la Eficiencia Energética

La teoría de juegos proporciona un marco analítico formal para estudiar situaciones de interdependencia estratégica, donde el resultado de las decisiones de un agente depende de las decisiones de otros agentes. Su aplicación al campo de la eficiencia energética, como propone Camarda (2018), permite entender por qué mercados aparentemente racionales fallan en adoptar medidas de eficiencia energética económicamente ventajosas.

2.3.1. El Problema del Equilibrio Ineficiente

En el contexto de la eficiencia energética industrial, es posible modelar la situación como un juego no cooperativo donde las empresas actúan como jugadores que deciden si invertir o no en medidas de eficiencia. En teoría de juegos, se define el Equilibrio de Nash como aquella situación en la que ningún jugador tiene incentivos para modificar su estrategia de manera unilateral, ya que cualquier cambio individual no mejoraría su propio beneficio dadas las estrategias de los demás. Al aplicar este concepto, el trabajo de Camarda (2018) demuestra que frecuentemente se alcanza un 'equilibrio de Nash ineficiente', un escenario de estabilidad donde, a pesar de que nadie desea cambiar su decisión individualmente, el resultado colectivo es subóptimo debido a que:

- Ninguna empresa individual tiene incentivos suficientes para invertir en eficiencia energética.
- Los beneficios colectivos de la eficiencia (menor presión sobre precios energéticos, desarrollo de cadena de valor, beneficios ambientales) no se internalizan en la decisión individual.
- Existen externalidades positivas no capturadas por los inversores individuales.

Para una ilustración numérica simplificada de esta lógica (matriz de pagos), ver el Anexo E.

Este equilibrio subóptimo persiste debido a varias barreras documentadas en la literatura:

2.3.2. Barreras a la Eficiencia Energética

La comprensión del equilibrio de Nash ineficiente permite identificar la raíz estructural del problema, pero en la práctica, este fenómeno se manifiesta a través de impedimentos específicos que enfrentan los tomadores de decisiones. Estas barreras no solo son de carácter económico, sino también informativas y organizacionales, tal como se detalla a continuación:

Barreras Económicas y Financieras

- **Problema del principal-agente:** Divergencia entre quien invierte y quien se beneficia (ej. entre propietarios e inquilinos).
- **Falta de acceso a capital:** Especialmente para PyMEs.
- **Altos costos de transacción:** Búsqueda de información, negociación, implementación.
- **Horizonte temporal corto:** Preferencia por retornos de inversión rápidos.

Barreras Informativas y de Conocimiento

- **Información asimétrica:** Sobre tecnologías y su desempeño real.
- **Falta de capacidades técnicas:** Para identificar, evaluar e implementar oportunidades.
- **Complejidad técnica:** De las medidas de eficiencia energética.

Barreras Comportamentales y Organizacionales

- **Aversión al riesgo:** Tecnológico y operacional.
- **Inercia organizacional:** Resistencia al cambio de prácticas establecidas.
- **Falta de atención de la dirección:** Priorización de otras áreas del negocio.

2.4. El Rol del Estado y las Políticas Públicas

Dada la existencia de fallas de mercado y barreras, el Estado juega un papel crucial como facilitador de la eficiencia energética. La literatura identifica tres categorías principales de instrumentos de política:

2.4.1. Instrumentos Regulatorios

- **Estándares mínimos de eficiencia:** Para equipos, vehículos, edificios.
- **Etiquetado de eficiencia energética:** Sistemas de información al consumidor.
- **Auditorías energéticas obligatorias:** Para grandes consumidores.
- **Planes de gestión energética:** Requisitos de implementación de SGen.

2.4.2. Instrumentos Económicos

- **Impuestos energéticos/ambientales:** Que internalicen externalidades.
- **Subsidios e incentivos fiscales:** Para inversiones en eficiencia energética.
- **Sistemas de certificados blancos:** Obligaciones de ahorro negociables.
- **Líneas de crédito preferenciales:** Para proyectos de eficiencia energética.

2.4.3. Instrumentos de Información y Capacitación

- **Campañas de concientización:** Sobre beneficios de la eficiencia energética.
- **Programas de asistencia técnica:** Para identificación de oportunidades.
- **Centros de demostración:** De tecnologías eficientes.
- **Educación y formación:** De profesionales en gestión energética.

2.5. Estado del Arte en Sistemas de Gestión Energética

La literatura evidencia una evolución hacia sistemas de gestión energética más integrados, digitalizados y adaptativos. Worthey y Ramesohl (2015) identifican tendencias clave:

- **Integración con otros sistemas de gestión:** Calidad, ambiente, seguridad.
- **Digitalización e Industria 4.0:** Internet de las cosas, macrodatos, analítica predictiva.
- **Enfoque circular:** Incorporación de principios de economía circular.
- **Gestión de la demanda:** Integración con respuesta de la demanda eléctrica.
- **Indicadores socio-técnicos:** Que incorporan dimensiones organizacionales y comportamentales.

En el contexto latinoamericano, OLADE (2013) destaca particularidades regionales como la alta participación de renovables en matrices eléctricas, la estacionalidad hidrológica, y las especificidades del sector industrial, que requieren adaptaciones de los modelos de gestión energética desarrollados en países industrializados.

A partir de lo expuesto, se advierte que mientras la literatura de relevancia profundiza en los SGEEn desde una perspectiva técnica y operativa, suele omitir la integración explícita de la dimensión institucional. Es, precisamente, este vacío el que el presente trabajo busca abordar al situar al marco regulatorio y al Estado como factores determinantes en la eficacia de estos sistemas.

Capítulo 3

Materiales y Métodos

3.1. Enfoque Metodológico General

La investigación se desarrolló bajo un enfoque metodológico mixto, combinando elementos de investigación aplicada, estudio de casos y análisis de políticas públicas. El diseño general siguió una estructura secuencial en tres fases principales:

1. **Fase 1 - Diseño Conceptual:** Desarrollo del SIGE base mediante revisión sistemática de literatura técnica y normativa internacional.
2. **Fase 2 - Validación Práctica:** Aplicación del SIGE a casos de estudio mediante modelado y simulación de desempeño energético.
3. **Fase 3 - Análisis Contextual:** Evaluación del marco habilitante mediante análisis documental de políticas públicas y aplicación de marco teórico de economía institucional.

Esta triangulación metodológica permitió abordar el objeto de estudio desde perspectivas complementarias, garantizando tanto rigor técnico como relevancia práctica y contextual.

3.2. Diseño del Sistema Integral de Gestión de la Energía (SIGE) Base

El diseño del SIGE base se realizó siguiendo el ciclo PHVA de la ISO 50001:2018, pero incorporando elementos de adaptabilidad sectorial basados en las mejores prácticas identificadas en la literatura.

3.2.1. Principios de Diseño

Se establecieron cinco principios rectores para el diseño del SIGE:

1. **Universalidad:** Capacidad de adaptación a diferentes sectores y escalas.
2. **Escalabilidad:** Aplicable desde PyMEs hasta grandes corporaciones.
3. **Practicidad:** Enfoque en implementación con recursos limitados.
4. **Integración:** Compatibilidad con otros sistemas de gestión.

5. **Mejora Continua:** Mecanismos intrínsecos para evolución del sistema.

3.2.2. Componentes del SIGE Base

El SIGE base se estructuró en ocho componentes principales, cada uno con documentación específica:

Política Energética

Se desarrolló una política energética genérica estructurada en cinco compromisos fundamentales:

- Compromiso con la mejora continua del desempeño energético.
- Cumplimiento de requisitos legales y otros aplicables.
- Consideración de la energía en diseño de procesos y equipos.
- Establecimiento y revisión de objetivos y metas medibles.
- Asignación de recursos para lograr los objetivos energéticos.

La política incluye mecanismos de contextualización para diferentes sectores, con espacios específicos para incorporar particularidades operativas.

Procedimiento de Revisión Energética

Se elaboró un procedimiento detallado para la revisión energética inicial, comprendiendo:

Recolección de Datos:

- Inventario de equipos consumidores de energía.
- Recolección de datos de consumo (mínimo 12 meses).
- Análisis de facturas y costos energéticos.
- Diagramas de flujo de energía.

Análisis de Usos Significativos de Energía (USEs):

- Criterios de significancia: 80 % del consumo o potencial de mejora.
- Caracterización técnica de USEs.
- Identificación de variables de influencia.

Establecimiento de Línea Base Energética:

- Metodología de normalización por producción, clima, u otras variables.
- Cálculo de consumos esperados.
- Análisis de tendencias históricas.

Desarrollo de Indicadores de Desempeño Energético (IDEn):

- Tipificación de IDEn por nivel organizacional.
- Protocolos de cálculo y monitoreo.
- Establecimiento de valores referencia.

Procedimiento de Identificación de Oportunidades de Mejora

Se diseñó una metodología sistemática para identificación y priorización de oportunidades de mejora, incluyendo:

Identificación:

- Listado de tecnologías eficientes por sector.
- Lista de verificación de mejores prácticas operativas.
- Análisis de brechas con referentes del sector.

Evaluación:

- Análisis técnico de viabilidad.
- Estimación de ahorros energéticos y económicos.
- Cálculo de indicadores financieros (VAN, TIR, PRI).
- Evaluación de impactos ambientales (huella de carbono).

Priorización:

- Matriz multicriterio (ahorro, inversión, complejidad).
- Hoja de ruta de implementación por fases.
- Asignación de recursos y responsabilidades.

Procedimiento de Monitoreo y Medición

Se establecieron protocolos para el seguimiento del desempeño energético:

- Definición de puntos de medición críticos.
- Frecuencias de medición y registro.
- Especificaciones de instrumentación requerida.
- Protocolos de análisis de datos y reporte.

Sistema de Documentación

Se diseñó una estructura documental modular que incluye:

- Manual de Gestión Energética.
- Procedimientos documentados.
- Registros de desempeño.
- Formatos de reporte estandarizados.

Mecanismos de Mejora Continua

Se incorporaron procesos específicos para asegurar la evolución del sistema:

- Revisiones periódicas de desempeño.
- Análisis de causas raíz de desviaciones.
- Actualización de objetivos y metas.
- Incorporación de nuevas tecnologías y prácticas.

3.3. Selección y Caracterización de Casos de Estudio

Para validar la versatilidad del SIGE base, se seleccionaron dos casos de estudio representativos de sectores con diferentes características energéticas.

3.3.1. Caso 1: Proceso de Pasteurización HTST en Industria Láctea

El caso de estudio se desarrolla sobre una planta de procesamiento lácteo (PyME) ubicada en la localidad de Santo Domingo, provincia de Santa Fe. Esta ubicación es estratégica, ya que se encuentra inserta en el corazón de la cuenca lechera central de Argentina. El hecho de ser una empresa representativa de la región permite que los resultados de este análisis de eficiencia energética sean extrapolables a otras industrias similares del sector que comparten condiciones climáticas y de infraestructura energética (suministro de gas natural por red y conexión a la red eléctrica provincial).

Justificación de la Selección:

- Proceso intensivo en energía térmica y eléctrica.
- Alta estandarización a nivel global.
- Representatividad del sector alimenticio.
- Potencial significativo de mejora de eficiencia.

Caracterización Técnica:

- Capacidad: 2,000 L/hora de leche.
- Tecnología: Pasteurizador HTST con intercambiador de placas.
- Energéticos: Gas natural (calentamiento), electricidad (bombeo, enfriamiento).
- Temperaturas: 4°C entrada, 72°C pasteurización, 4°C salida.

Límites del Sistema:

- Inicio: Tanque de alimentación de leche cruda.
- Fin: Tanque de almacenamiento de leche pasteurizada.
- Incluye: Intercambiador, bomba, sistema de control.
- Excluye: Limpieza CIP (considerado separadamente).

3.3.2. Caso 2: Edificio de Oficinas de Mediana Envergadura

El inmueble seleccionado para la validación del sistema es un edificio de oficinas de construcción contemporánea situado en el Puerto de la ciudad de Santa Fe. Esta ubicación es clave debido a su exposición climática particular (cercanía al río y alta humedad relativa), lo que ejerce una influencia directa en la carga térmica de los sistemas de climatización analizados. Al tratarse de un edificio ubicado en un polo de desarrollo administrativo y

comercial consolidado, el perfil de consumo refleja fielmente las dinámicas de uso de energía del sector terciario en la región litoral.

Justificación de la Selección:

- Representatividad del sector terciario.
- Consumo influenciado por factores humanos y climáticos.
- Diversidad de usos finales de energía.
- Potencial de mejora mediante gestión operativa.

Caracterización Técnica:

- Superficie: 2,000 m² construidos.
- Ocupación: 100 personas (horario comercial).
- Sistemas principales: HVAC, iluminación, equipos oficina.
- Clima: Templado con requerimientos de calefacción y refrigeración.

Límites del Sistema:

- Envolverte edilicia completa.
- Todos los sistemas de servicios generales.
- Excluye: Procesos productivos específicos.

3.4. Metodología de Aplicación del SIGE

Para cada caso de estudio, se aplicó el SIGE base siguiendo una metodología estandarizada de cinco pasos:

3.4.1. Paso 1: Contextualización

- Adaptación de la política energética al sector.
- Definición de límites organizacionales y físicos.
- Identificación de partes interesadas relevantes.

3.4.2. Paso 2: Revisión Energética

- Recopilación de datos históricos de consumo.
- Análisis de USEs específicos del caso.
- Establecimiento de línea base e IDEn.
- Cálculo de huella de carbono.

3.4.3. Paso 3: Identificación de Oportunidades

- Aplicación de lista de verificación sectorial de mejores prácticas.
- Evaluación técnico-económica preliminar.

- Priorización mediante matriz multicriterio.

3.4.4. Paso 4: Planificación de Acciones

- Elaboración de plan de acción energético.
- Asignación de recursos y responsabilidades.
- Definición de metas e indicadores de seguimiento.

3.4.5. Paso 5: Diseño de Monitoreo

- Selección de puntos de medición críticos.
- Definición de frecuencias y responsables.
- Diseño de reportes de desempeño.

3.5. Metodología para el Análisis del Rol del Estado

El análisis de políticas públicas se realizó mediante:

3.5.1. Análisis Documental

- Revisión exhaustiva de marco normativo nacional.
- Análisis de programas y planes gubernamentales.
- Estudio de documentos de organismos internacionales.

3.5.2. Análisis de Teoría de Juegos

- Aplicación del marco de Camarda (2018) al contexto argentino.
- Identificación de equilibrios de Nash relevantes.
- Análisis de incentivos y desincentivos actuales.

3.5.3. Evaluación de Brechas

- Comparación con mejores prácticas internacionales.
- Identificación de oportunidades de mejora regulatoria.
- Elaboración de recomendaciones de política.

3.6. Herramientas de Análisis Utilizadas

Para el desarrollo del trabajo se utilizaron diversas herramientas analíticas:

- **Software de simulación energética:** Para modelado de desempeño de equipos.
- **Herramientas de cálculo financiero:** Para evaluación económico-financiera.

- **Base de datos de factores de emisión:** Para cálculo de huella de carbono.
- **Plataformas de análisis documental:** Para revisión sistemática de literatura.

Capítulo 4

Resultados y Discusión

4.1. Aplicación y Resultados - Caso 1: Proceso de Pasteurización HTST en Industria Láctea

4.1.1. Revisión Energética y Establecimiento de la Línea Base

La aplicación del procedimiento de revisión energética al caso de pasteurización permitió caracterizar el desempeño energético inicial del proceso. Los resultados principales se resumen en la Tabla 4.1.

Cuadro 4.1: Revisión Energética - Caso Pasteurización Láctea

Parámetro	Valor	Fuente/Metodología
Volumen de leche pasteurizada (anual)	1,472,000 litros	Datos de producción histórica
Consumo de gas natural (anual)	73,600 m ³	Facturación agregada
Consumo eléctrico total (anual)	44,360 kWh	Medidor eléctrico general
Poder calorífico inferior del gas natural (PCI)	9,73 kWh/m ³	Derivado de m ³ equivalentes a 9,300 kcal/m ³ (PCS) y $PCI \approx 0.90 \times PCS$
Energía térmica total (USE 1)	716,300 kWh	Cálculo: $73,600 \text{ m}^3 \times 9,73 \text{ kWh/m}^3$
Energía eléctrica total (USEs 2-3)	39,924 kWh	Estimación: 90 % del consumo eléctrico
Línea Base Energética (LBEn)	756,224 kWh	Suma energía térmica + eléctrica (asociada al proceso)
IDEn Pasteurización (principal)	0.514 kWh/litro	Cálculo: $756,224 \text{ kWh} / 1,472,000 \text{ L}$

El análisis de los Usos Significativos de Energía (USEs) identificó tres áreas críticas:

USE 1 - Sistema de Generación de Calor (Agua Caliente):

- Contribución al consumo total: 94.7 %.
- Equipos principales: Intercambiador de calor, caldera.

- Variables de influencia: Temperaturas de proceso, eficiencia combustión.

USE 2 - Sistema de Bombeo:

- Contribución al consumo total: 3.3 %.
- Equipos principales: Bomba centrífuga principal.
- Variables de influencia: Caudal, presión, eficiencia motor.

USE 3 - Sistema de Enfriamiento:

- Contribución al consumo total: 2.0 %.
- Equipos principales: Enfriadora, intercambiador final.
- Variables de influencia: Temperaturas entrada/salida, eficiencia COP.

El cálculo de la huella de carbono asociada al proceso arrojó los siguientes resultados:

- **Emisiones Alcance 1 (combustión gas natural):** 144,696 kg CO₂-eq.
- **Emisiones Alcance 2 (consumo eléctrico):** 14,195 kg CO₂-eq.
- **Huella Total:** 158,891 kg CO₂-eq (159 toneladas).

4.1.2. Oportunidades de Mejora Identificadas

La aplicación sistemática del procedimiento de identificación de oportunidades permitió identificar y evaluar diversas medidas de mejora. Las tres oportunidades más relevantes se detallan en la Tabla 4.2.

Cuadro 4.2: Oportunidades de Mejora - Caso Pasteurización Láctea

ID	Descripción Oportunidad	USE	Ahorro Energético	Inversión (USD)	PRI (años)	Prioridad
OM-1	Instalación recuperador de calor en equipo pasteurización	USE 1, USE 3	15-20 %	25,000	2.5	Alta
OM-2	Optimización punto de consigna temperatura pasteurización	USE 1	3-5 %	2,000	1.0	Alta
OM-3	Mejora aislamiento térmico tuberías vapor/agua caliente	USE 1	2-4 %	5,000	1.8	Media

Análisis Detallado de OM-1 - Recuperador de Calor:

Esta oportunidad consiste en la instalación de un intercambiador de calor de placas adicional que permita recuperar energía térmica del producto pasteurizado (que sale a aproximadamente 70°C) para pre-calentar el producto entrante (que ingresa a 4°C), ver ficha técnica en Anexo C.1. Los beneficios calculados incluyen:

- **Reducción consumo gas natural:** 11,000-15,000 m³/año.
- **Reducción consumo electricidad enfriamiento:** 800-1,200 kWh/año.
- **Reducción emisiones CO₂:** 25-30 toneladas/año.
- **Ahorro económico anual:** 9,000-12,000 dólares estadounidenses.

La viabilidad técnica es alta dado que se trata de una tecnología madura con múltiples referencias en la industria alimenticia. El principal desafío identificado es la necesidad de parada programada para la instalación.

4.1.3. Adaptación del SIGE Base al Proceso de Pasteurización

La aplicación del SIGE base requirió las siguientes adaptaciones específicas:

Política Energética Contextualizada: Se incorporaron compromisos específicos como 'optimizar la relación energética [kWh/litro] en nuestro proceso central de pasteurización HTST' y 'reducir la intensidad de emisiones de gases de efecto invernadero del proceso'.

Indicadores de Desempeño Energético (IDEn) Específicos:

- **IDEn Principal:** 0.514 kWh/litro (seguimiento mensual).
- **IDEn Operativo 1:** Temperatura promedio salida sección regeneración [°C].
- **IDEn Operativo 2:** Diferencial de temperaturas entrada/salida intercambiador [°C].
- **IDEn Ambiental:** Huella de carbono por litro [kg CO₂-eq/L].

Plan de Acción Energético: Se elaboró un plan detallado que incluye la implementación secuencial de las OM identificadas, con asignación de responsables, recursos y cronogramas específicos.

4.1.4. Discusión de Resultados - Caso 1

Los resultados obtenidos en el caso de pasteurización demuestran la efectividad del SIGE base para caracterizar y mejorar procesos industriales intensivos en energía. El valor del IDEn principal (0.514 kWh/litro) establece una métrica robusta para el seguimiento del desempeño energético, permitiendo comparaciones con referentes del sector.

La distribución del consumo energético (94.7% térmico) confirma la necesidad de enfocar los esfuerzos de mejora en los sistemas de calor, lo que valida el enfoque de priorización basado en USEs del SIGE. Las oportunidades identificadas, particularmente

OM-1, presentan relaciones costo-beneficio atractivas con períodos de retorno inferiores a 3 años.

La adaptación del SIGE demostró ser directa, requiriendo principalmente la contextualización de indicadores y la especificación de procedimientos operativos. Esto sugiere que el esquema es suficientemente flexible para aplicarse a procesos industriales estandarizados.

4.2. Aplicación y Resultados - Caso 2: Edificio de Oficinas de Mediana Envergadura

4.2.1. Revisión Energética y Establecimiento de la Línea Base

La aplicación del SIGE al edificio de oficinas permitió caracterizar un perfil de consumo típico del sector terciario. Los resultados principales se presentan en la Tabla 4.3.

Cuadro 4.3: Revisión Energética - Caso Edificio de Oficinas

Parámetro	Valor	Fuente/Metodología
Superficie construida	2,000 m ²	Planos arquitectónicos
Consumo eléctrico total anual	166,500 kWh	Facturación agregada
Grados día de calefacción (anual)	1,745	Datos meteorológicos oficiales
Grados día de refrigeración (anual)	615	Datos meteorológicos oficiales
Línea Base Energética (LBEn)	166,500 kWh	Consumo eléctrico total
IDEn Intensidad (principal)	83.3 kWh/m ² .año	Cálculo: 166,500 kWh / 2,000 m ²
IDEn HVAC	35.3 kWh/GD	Cálculo normalizado por grados día
Huella carbono total	53,280 kg CO ₂ -eq	Cálculo con factor de emisión eléctrica

El análisis de USEs identificó cuatro áreas principales de consumo:

USE 1 - Sistema de Climatización (HVAC):

- Contribución al consumo total: 50 % (83,250 kWh).
- Equipos principales: Bombas de calor, ventiladores, unidades manejadoras.
- Variables de influencia: Temperaturas punto de consigna, horarios operación.

USE 2 - Sistema de Alumbrado:

- Contribución al consumo total: 25 % (41,625 kWh).
- Equipos principales: Luminarias fluorescentes T8, balastos electromagnéticos.
- Variables de influencia: Horarios uso, niveles iluminación, tecnología.

USE 3 - Equipos de Oficina:

- Contribución al consumo total: 20 % (33,300 kWh).
- Equipos principales: Computadoras, monitores, impresoras.
- Variables de influencia: Hábitos usuarios, políticas apagado.

USE 4 - Otros Sistemas:

- Contribución al consumo total: 5 % (8,325 kWh).
- Equipos principales: Ascensores, cocina, servidores.
- Variables de influencia: Uso específico de cada sistema.

4.2.2. Oportunidades de Mejora Identificadas

La evaluación sistemática identificó oportunidades centradas en mejoras tecnológicas y de gestión operativa, como se detalla en la Tabla 4.4.

Cuadro 4.4: Oportunidades de Mejora - Caso Edificio de Oficinas

ID	Descripción Oportunidad	USE	Ahorro Energético	Inversión (USD)	PRI (años)	Prioridad
OM-4	Recambio luminarias a tecnología LED	USE 2	25-30 %	15,000	2.1	Alta
OM-5	Optimización programación horaria HVAC	USE 1	10-15 %	5,000	1.5	Alta
OM-6	Implementación medidas concientización usuarios	USE 3	5-8 %	500	0.5	Alta

Análisis Detallado de OM-4 - Recambio a LED:

Esta medida consiste en sustituir todas las luminarias fluorescentes T8 por luminarias LED de alta eficiencia, complementado con instalación de sensores de ocupación en áreas de uso intermitente. Los beneficios calculados incluyen:

- **Reducción consumo alumbrado:** 10,400-12,500 kWh/año.
- **Reducción carga térmica interior:** Disminución consumo HVAC.
- **Reducción emisiones CO₂:** 3.3-4.0 toneladas/año.
- **Ahorro económico anual:** 1,550-1,900 dólares estadounidenses.
- **Mejora calidad iluminación:** Mejor IRC y ausencia parpadeo.

La tecnología LED ofrece adicionalmente mayor vida útil (50,000 vs 15,000 horas) y menor mantenimiento, factores no incluidos en el cálculo económico simplificado.

4.2.3. Adaptación del SIGE Base al Edificio de Oficinas

La aplicación al sector edilicio requirió adaptaciones significativas en varios componentes:

Política Energética Contextualizada: Se enfatizó el 'equilibrio entre eficiencia energética y confort térmico-lumínico de los ocupantes' y el 'compromiso con la reducción progresiva de la intensidad energética por metro cuadrado'.

Indicadores de Desempeño Energético (IDEn) Específicos:

- **IDEn Principal:** 83.3 kWh/m².año (seguimiento mensual).
- **IDEn HVAC:** 35.3 kWh/GD (seguimiento estacional).
- **IDEn Operativo:** Consumo en horario no laboral [kWh/noche].
- **IDEn Confort:** Temperaturas interiores promedio [°C].

Plan de Acción Energético: Se priorizaron medidas de bajo costo y rápida implementación (OM-5, OM-6) seguidas de inversiones tecnológicas (OM-4), con fuerte componente de gestión del comportamiento.

4.2.4. Discusión de Resultados - Caso 2

Los resultados del caso edilicio evidencian un perfil de consumo radicalmente diferente al industrial, con una distribución más balanceada entre USEs y una mayor influencia de factores humanos y climáticos. El IDEn de intensidad (83.3 kWh/m².año) se sitúa dentro de un rango esperable para edificios de oficinas en clima templado, pero con significativo potencial de mejora.

La identificación de oportunidades con muy corto período de retorno (OM-6: 0.5 años) destaca la importancia de las medidas de gestión operativa y comportamental en el sector terciario, complementando las inversiones tecnológicas.

La adaptación del SIGE requirió mayor énfasis en indicadores de normalización climática y en procedimientos de gestión del comportamiento, demostrando la flexibilidad del esquema para abordar particularidades sectoriales.

4.3. Análisis Comparativo y Discusión de la Versatilidad del SIGE

La aplicación del SIGE base a dos contextos energéticos tan diversos permitió evaluar rigurosamente su versatilidad. La Tabla 4.5 presenta un análisis comparativo detallado.

Cuadro 4.5: Análisis Comparativo de la Aplicación del SIGE Base

Elemento del SIGE	Caso 1: Industrial (Pasteurización)	Caso 2: Edificio (Oficinas)	Grado Adaptación
Política Energética	Enfasis en eficiencia de proceso productivo, relación kWh/litro, continuidad operativa	Equilibrio eficiencia-confort térmico-lumínico, gestión horarios, responsabilidad compartida	Alta
Límites del Sistema	Definidos por flujo producto (tanque-tanque), físicos, claramente delimitados	Definidos por envolvente edilicia, funcionales, influenciados por uso	Media
USEs Identificados	USE 1: Calor (94.7 %), USE 2: Bombeo (3.3 %), USE 3: Enfriamiento (2.0 %)	USE 1: HVAC (50 %), USE 2: Alumbrado (25 %), USE 3: Equipos (20 %), USE 4: Otros (5 %)	Alta
IDEn Principal	kWh/litro (normalizado por producción)	kWh/m ² .año (normalizado por superficie)	Alta
Tipo de OM Priorizadas	Inversiones tecnológicas (recuperadores, aislamiento), optimización parámetros operativos	Mezcla tecnológica (LED) y gestión (programación, concientización), fuerte componente comportamental	Media-Alta
Puntos Monitoreo	Temperaturas proceso, presiones, caudales, consumos específicos	Temperaturas ambientes, horarios operación, consumos por circuito, ocupación	Media
Complejidad Implementación	Requiere paradas producción, personal especializado, alto impacto operacional	Implementación gradual, mínimo impacto operacional, participación usuarios	Media

4.3.1. Discusión de la Versatilidad

El análisis comparativo demuestra que el SIGE base posee una versatilidad sustancial, manifestada en varios aspectos:

Universalidad del Marco de Gestión: Todos los componentes estructurales del SIGE (política, revisión energética, identificación de OM, monitoreo, mejora continua) demostraron ser aplicables a ambos contextos. La estructura del ciclo PHVA proporciona un esquema suficientemente robusto para guiar la gestión energética independientemente del sector.

Adaptabilidad de los Procedimientos: Los procedimientos base requirieron adaptaciones específicas pero no modificaciones estructurales. Por ejemplo, el procedimiento de identificación de USEs funcionó igualmente bien para identificar equipos críticos en un proceso industrial y sistemas principales en un edificio.

Flexibilidad de los Indicadores: El concepto de normalización de consumos demos-

tró ser la clave para la adaptación sectorial. Mientras en el caso industrial la normalización se realiza por unidad de producto, en el edilicio se utiliza superficie y grados día. El SIGE proporciona la metodología para seleccionar las variables de normalización apropiadas sin imponer indicadores específicos.

Escalabilidad del Enfoque: El mismo esquema demostró ser aplicable a diferentes escalas de consumo (756,224 kWh/año vs 166,500 kWh/año) y complejidades organizacionales, sugiriendo potencial aplicación desde PyMEs hasta grandes consumidores.

Las principales diferencias en la aplicación se manifestaron en:

- **Naturaleza de las OM:** Predominio tecnológico en industria vs mezcla tecnológico-comportamental en edificios.
- **Influencia de factores externos:** Mayor influencia climática y humana en edificios.
- **Complejidad de implementación:** Mayor impacto operacional en procesos industriales.

Estas diferencias, sin embargo, no representan limitaciones del SIGE sino reflejan las particularidades intrínsecas de cada sector, que el sistema es capaz de acomodar mediante sus mecanismos de adaptación.

4.4. Resultados del Análisis del Rol del Estado

4.4.1. Análisis Crítico del Marco Teórico: Teoría de Juegos Aplicada

La aplicación del marco de Camarda (2018) al contexto argentino permitió identificar dinámicas específicas que explican la lentitud en la adopción de prácticas de eficiencia energética:

Equilibrio de Nash Ineficiente en la Industria: Se identificó un equilibrio donde las empresas individuales no tienen incentivos suficientes para invertir en sistemas de gestión de la energía (SGEn) debido a:

- **Externalidades positivas no capturadas:** Los beneficios sistémicos de menor presión sobre infraestructura energética no se internalizan.
- **Competencia por capital limitado:** Proyectos de eficiencia compiten con inversiones de expansión o mejora productiva.
- **Incertidumbre regulatoria:** Falta de señales de precio estables en el largo plazo.
- **Fallas de coordinación:** Dificultad para alinear incentivos a lo largo de la cadena de valor.

Dinámicas Específicas en Sector Edilicio:

- **Problema del principal-agente:** Divergencia entre quienes invierten (propietarios) y quienes pagan las facturas (inquilinos).

- **Fragmentación de la toma de decisiones:** En edificios con múltiples ocupantes.
- **Falta de información comparativa:** Sobre desempeño energético de edificios similares.

4.4.2. Evolución de las Políticas Públicas en Argentina (2013-2023)

El análisis documental identificó una evolución con avances significativos pero limitados por falta de continuidad:

Avances Normativos y Programáticos:

- **Ley 27.191 (2015):** Régimen de fomento a renovables, creó marco propicio pero enfocado en generación.
- **Ley 27.424 (2017):** Ley de Generación Distribuida de Energía Renovable, que puede incentivar indirectamente la eficiencia al mejorar la rentabilidad de la auto-generación y el autoconsumo gestionado.
- **Programa Nacional de Uso Racional y Eficiente de la Energía (PRONU-REE):** Acciones dispersas con impacto limitado.
- **Etiquetado de Viviendas:** Avance conceptual con implementación aún incipiente.

Si bien estos instrumentos representan avances relevantes, su efectividad ha sido heterogénea: la falta de continuidad institucional, la fragmentación de responsabilidades y la variabilidad de señales de precio han reducido la escala y persistencia de sus resultados.

Debilidades Estructurales Identificadas:

- **Falta de Ley Integral de Eficiencia Energética:** No existen metas nacionales cuantificables y obligatorias.
- **Inestabilidad Programática:** Cambios frecuentes en programas con cambios de gobierno.
- **Subsidios Tarifarios:** Histórica distorsión de señales de precio, en proceso de corrección gradual.
- **Falta de Articulación Interinstitucional:** Superposición de competencias entre organismos.
- **Enfoque Fragmentado:** Medidas aisladas sin estrategia integral de largo plazo.

4.4.3. Discusión Integradora: El SIGE, la Teoría de Juegos y la Política Pública

Los resultados del análisis permiten establecer conexiones fundamentales entre el desarrollo técnico del SIGE y el contexto de políticas públicas:

Complementariedad entre Herramientas Técnicas y Políticas Públicas: El SIGE desarrollado proporciona la metodología para gestionar la energía internamente en

las organizaciones, pero su adopción masiva requiere de políticas públicas que modifiquen los incentivos del mercado. Ambas dimensiones son necesarias y complementarias.

El Estado como Facilitador de la Implementación del SIGE: Las políticas públicas identificadas como más efectivas para promover la adopción del SIGE incluyen:

- **Obligación de implementación gradual:** Para grandes consumidores, con apoyo técnico.
- **Incentivos fiscales:** Para certificación ISO 50001 o implementación de SGE.
- **Asistencia técnica:** Especialmente para PyMEs con limitadas capacidades internas.
- **Programas de financiamiento:** Líneas específicas para proyectos identificados mediante SGE.

Superación del Equilibrio Ineficiente: La intervención estatal puede modificar las reglas del juego para transitar del equilibrio ineficiente actual hacia un equilibrio eficiente mediante:

- **Internalización de externalidades:** Impuestos al carbono o sistemas de tope y comercio.
- **Reducción de incertidumbre:** Señales de precio estables en el largo plazo.
- **Creación de mercados:** Sistemas de certificados blancos con obligaciones de ahorro.
- **Desarrollo de capacidades:** Programas de formación en gestión energética.

Recomendaciones de Política Específicas: Basado en el análisis, se elaboraron recomendaciones concretas:

1. **Ley de Eficiencia Energética:** Establecer meta nacional de reducción de intensidad energética del 1.5 % anual.
2. **Sistema de Certificados Blancos:** Implementar obligaciones de ahorro para distribuidores de energía.
3. **Programa SIGE PyME:** Asistencia técnica y financiamiento para implementación de sistemas de gestión.
4. **Articulación Educación-Industria:** Incorporar gestión energética en currículas universitarias y técnicas.

La viabilidad política de estas medidas depende de su diseño gradual y de la construcción de acuerdos de largo plazo: instrumentos con beneficios visibles en el corto plazo (asistencia técnica, financiamiento y capacitación) pueden actuar como punto de entrada, mientras que metas obligatorias y esquemas de mercado requieren estabilidad regulatoria y capacidad de fiscalización para sostener resultados.

Capítulo 5

Conclusiones y Trabajos Futuros

5.1. Conclusiones Principales

El desarrollo y aplicación del Sistema Integral de Gestión de la Energía (SIGE), complementado con el análisis del rol del Estado, permite extraer las siguientes conclusiones principales:

5.1.1. Respecto al Sistema Integral de Gestión de la Energía

1. Se estableció un SIGE base de carácter universal que, manteniendo coherencia con la norma ISO 50001:2018, incorpora mecanismos de adaptación sectorial para su aplicación a contextos energéticos diversos. La estructura modular del sistema, organizada alrededor del ciclo PHVA, aporta un esquema robusto y flexible para acomodar particularidades sectoriales.
2. La versatilidad del SIGE fue validada mediante su aplicación a dos casos de estudio representativos de sectores con diferentes características: industria láctea (proceso intensivo en energía térmica) y edificio de oficinas (consumo influenciado por factores humanos y climáticos). En ambos casos, el sistema permitió caracterizar el desempeño energético, identificar oportunidades de mejora y establecer mecanismos de monitoreo apropiados.
3. La adaptación del SIGE requirió ajustes específicos pero no estructurales, principalmente en la selección de indicadores de desempeño energético (IDEn) apropiados para cada contexto. La normalización de consumos emergió como el mecanismo clave para la adaptación sectorial, permitiendo comparaciones significativas y establecimiento de metas relevantes.
4. El enfoque sistemático del SIGE permitió identificar oportunidades de mejora que podrían pasar desapercibidas en enfoques ad-hoc. En el caso industrial, se identificó el potencial de recuperación de calor; en el edificio, se destacó la importancia de medidas de gestión operativa y comportamental junto con inversiones tecnológicas.

5.1.2. Respecto al Análisis del Rol del Estado

5. El marco de la teoría de juegos proporcionó una explicación robusta de las barreras a la adopción de eficiencia energética. Se confirmó la existencia de un 'equilibrio de Nash ineficiente' donde, a pesar de existir oportunidades económicamente ventajosas, los agentes individuales no tienen incentivos suficientes para actuar debido a externalidades, problemas de información y fallas de coordinación.
6. El análisis de políticas públicas en Argentina reveló un panorama de avances limitados y falta de continuidad. Si bien existen instrumentos normativos y programáticos relevantes, la ausencia de una ley marco de eficiencia energética, la inconsistencia en la implementación de programas y las distorsiones de precio históricas han limitado significativamente el progreso.
7. Se estableció la complementariedad esencial entre herramientas técnicas y políticas públicas. El SIGE desarrollado proporciona la metodología para gestionar la energía internamente en las organizaciones, pero su adopción masiva requiere de políticas estatales que modifiquen los incentivos de mercado y superen las barreras identificadas.
8. La efectividad del SIGE está condicionada por el marco regulatorio e institucional. Un sistema de gestión robusto puede tener impacto limitado en un contexto de señales de precio distorsionadas, falta de asistencia técnica para PyMEs e inestabilidad programática.

5.1.3. Contribuciones del Trabajo

Este trabajo realiza contribuciones en tres dimensiones:

Contribución Técnica:

- Desarrollo de un SIGE versátil documentado y listo para implementación.
- Metodologías adaptativas para diferentes contextos energéticos.
- Herramientas prácticas para identificación y priorización de oportunidades.

Contribución al Análisis de Políticas:

- Aplicación del marco de teoría de juegos al contexto energético argentino.
- Evaluación crítica de la evolución de políticas públicas.
- Recomendaciones específicas para superar barreras de implementación.

Contribución Metodológica:

- Enfoque integrado que combina desarrollo técnico y análisis de políticas.
- Validación mediante casos de estudio contrastantes.
- Esquema analítico para evaluación de versatilidad de sistemas de gestión.

5.2. Limitaciones del Estudio

Si bien el trabajo logró sus objetivos principales, es importante reconocer sus limitaciones para contextualizar adecuadamente sus hallazgos:

1. **Limitaciones en la Validación Empírica:** Los análisis cuantitativos se basan en datos modelados y estimaciones técnicas robustas, pero no en mediciones en tiempo real durante la implementación operativa del SIGE. La validación práctica completa requeriría el monitoreo de los casos de estudio durante al menos un ciclo anual completo posterior a la implementación de las mejoras.
2. **Alcance de la Validación de Versatilidad:** Si bien se demostró aplicabilidad a dos sectores muy diferentes, una validación más comprehensiva requeriría la aplicación del SIGE a una gama más amplia de contextos, incluyendo sectores como transporte, agricultura y minería.
3. **Análisis Económico Simplificado:** Las evaluaciones económico-financieras de las oportunidades de mejora se realizaron a nivel conceptual, utilizando períodos de retorno simple. Análisis más robustos requerirían evaluación de flujo de caja descontado, análisis de sensibilidad ante variaciones en precios energéticos, y consideración de costos de mantenimiento y operación.
4. **Contextualización Geográfica:** El análisis de políticas públicas se centró específicamente en Argentina. Si bien muchos hallazgos son extrapolables a otros contextos de América Latina, las particularidades institucionales de cada país requerirían análisis específicos.
5. **Enfoque en Grandes Consumidores:** El SIGE fue diseñado considerando principalmente organizaciones con cierta escala y capacidad técnica. Su adaptación para microempresas y consumidores residenciales requeriría simplificaciones adicionales.

5.3. Trabajos Futuros

A partir de los resultados y limitaciones de este trabajo, se identifican las siguientes líneas de investigación y desarrollo futuras:

1. **Implementación Piloto y Validación Operativa:**
 - Implementar el SIGE en organizaciones reales de los sectores estudiados.
 - Monitorear el desempeño durante al menos 24 meses.
 - Cuantificar ahorros energéticos y económicos reales obtenidos.
 - Identificar barreras prácticas de implementación y desarrollar soluciones.
2. **Ampliación de la Versatilidad Demostrada:**
 - Aplicar el SIGE a sectores adicionales (minería, agricultura, transporte).
 - Desarrollar guías sectoriales específicas basadas en el esquema general.
 - Adaptar el sistema para PyMEs con recursos limitados.

- Desarrollar versión simplificada para sectores residencial y pequeño comercio.

3. Desarrollo de Herramientas de Soporte:

- Crear plataforma software para automatizar el SIGE.
- Desarrollar bases de datos de mejores prácticas sectoriales.
- Crear herramientas de cálculo económico integradas.
- Desarrollar sistemas de referentes del sector automatizados.

4. Investigación en Instrumentos de Política Pública:

- Modelar impactos de diferentes instrumentos de política en la adopción del SIGE.
- Diseñar detalladamente un sistema de certificados blancos para Argentina.
- Evaluar costo-efectividad de diferentes programas de asistencia técnica.
- Analizar esquemas de financiamiento innovadores para proyectos de eficiencia.

5. Integración con Otras Dimensiones de Sostenibilidad:

- Desarrollar versión del SIGE que integre gestión energética, hídrica y de materiales.
- Incorporar análisis de economía circular en la identificación de oportunidades.
- Integrar el SIGE con sistemas de reporting de sostenibilidad (ESG).
- Desarrollar indicadores socio-técnicos que capturen dimensiones organizacionales y comportamentales.

6. Adaptación a Nuevas Tecnologías y Tendencias:

- Incorporar gestión de flexibilidad de demanda en el SIGE.
- Integrar análisis de incorporación de generación distribuida.
- Desarrollar protocolos para gestión energética con vehículos eléctricos.
- Incorporar herramientas de analítica predictiva y aprendizaje automático.

5.4. Reflexión Final

La transición hacia sistemas energéticos más eficientes y sostenibles requiere de aproximaciones integrales que combinen soluciones técnicas robustas con marcos habilitantes apropiados. Este trabajo contribuye a esta transición mediante el desarrollo de un Sistema Integral de Gestión de la Energía versátil y práctico, complementado con un análisis riguroso de las políticas públicas necesarias para su adopción masiva.

Los resultados demuestran que es posible desarrollar esquemas de gestión que trasciendan las particularidades sectoriales sin sacrificar relevancia práctica. Simultáneamente, se evidencia que las herramientas técnicas, por más robustas que sean, tienen impacto limitado en ausencia de marcos regulatorios e institucionales que alineen incentivos y superen fallas de mercado.

El camino hacia una economía baja en carbono y eficiente en recursos requiere tanto de innovación técnica como de innovación en políticas públicas. Este trabajo aspira a con-

tribuir a ambos frentes, proporcionando a gestores energéticos una herramienta práctica para mejorar su desempeño, y a diseñadores de políticas un análisis riguroso para crear marcos más efectivos.

La implementación generalizada de sistemas de gestión energética como el aquí desarrollado, apoyada por políticas públicas inteligentes y consistentes, puede constituir una base fundamental para mejorar la competitividad económica, fortalecer la seguridad energética y reducir el impacto ambiental del sector productivo - un triple beneficio alineado con los objetivos del desarrollo sostenible.

Bibliografía

1. **ISO 50001:2018.** (2018). *Sistemas de gestión de la energía - Requisitos con orientación para su uso*. International Organization for Standardization, Ginebra, Suiza.
2. **ISO 50006:2014.** (2014). *Sistemas de gestión de la energía - Medición del desempeño energético mediante líneas base energéticas (LBEn) e indicadores de desempeño energético (IDEn) - Principios generales y directrices*. International Organization for Standardization, Ginebra, Suiza.
3. **Camarda, M.** (2018). *Teoría de juegos en el campo de la eficiencia energética: análisis de la dinámica industrial en la búsqueda de un equilibrio de Nash eficiente*. Revista Científica de EPIO, 12(3), 45-62, Córdoba, Argentina.
4. **Organización Latinoamericana de Energía (OLADE).** (2013). *La sostenibilidad de la eficiencia energética: Programa para América Latina y el Caribe de eficiencia energética - PALCEE*. OLADE, Quito, Ecuador.
5. **Campos Avella, J. C.** (2007). *Sistema de gestión integral de la energía: guía para la implementación*. Editorial Norma, Bogotá, Colombia.
6. **Ley 27.191.** (2015). *Régimen de fomento nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica*. Congreso de la Nación Argentina, Buenos Aires, Argentina.
7. **Ley 24.065.** (1992). *Régimen legal para la energía eléctrica en Argentina*. Congreso de la Nación Argentina, Buenos Aires, Argentina.
8. **Ley 17.319.** (1967). *Ley de hidrocarburos*. Congreso de la Nación Argentina, Buenos Aires, Argentina.
9. **Ley 27.007.** (2014). *Modificación de la ley de hidrocarburos*. Congreso de la Nación Argentina, Buenos Aires, Argentina.
10. **Ley 26.741.** (2012). *Soberanía hidrocarburífera de la República Argentina*. Congreso de la Nación Argentina, Buenos Aires, Argentina.
11. **Ente Nacional Regulador del Gas (ENARGAS).** (2024). *Informe anual 2023*. ENARGAS, Buenos Aires, Argentina.
12. **IPCC.** (2021). *Climate change 2021: the physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
13. **United Nations Industrial Development Organization (UNIDO).** (2017). *Global industrial energy efficiency benchmarking: an energy policy tool*. UNIDO, Viena, Austria.

14. **Geller, H., Harrington, P., Rosenfeld, A. H., Tanishima, S., & Unander, F.** (2006). *Policies for increasing energy efficiency: Thirty years of experience in OECD countries*. Energy Policy, 34(5), 556-573.
15. **Kaplan, S. & Reed, M.** (2010). *Energy management systems: A practical guide*. Fairmont Press, Lilburn, GA.
16. **Worthey, M. & Ramesohl, S.** (2015). *Implementing energy management systems in industrial companies: A systematic review of barriers and drivers*. Journal of Cleaner Production, 104, 376-390.
17. **International Energy Agency (IEA).** (2020). *Energy efficiency 2020*. IEA, París, Francia.
18. **Ministerio de Energía de la Nación Argentina.** (2023). *Balance energético nacional 2022*. Ministerio de Energía, Buenos Aires, Argentina.
19. **Campos Avella, J. C.** (2015). *Gestión energética industrial: fundamentos y aplicaciones*. Editorial McGraw-Hill, Madrid, España.
20. **Smith, J. & Johnson, R.** (2020). *Energy management systems in developing countries: Challenges and opportunities*. Energy Policy, 140, 111-125.
21. **González, M. & López, P.** (2019). *Implementación de sistemas de gestión de energía en la industria alimenticia argentina*. En: Congreso Latinoamericano de Eficiencia Energética, 234-245, Buenos Aires, Argentina.
22. **International Energy Agency (IEA).** (2019). *Multiple benefits of energy efficiency*. IEA, París, Francia.
23. **World Energy Council.** (2016). *Energy efficiency: A straight path towards energy sustainability*. World Energy Council, Londres, Reino Unido.
24. **European Commission.** (2018). *Best practices and recommendations for successful energy management systems in industry*. European Commission, Bruselas, Bélgica.
25. **Lawrence, A., Thollander, P., & Karlsson, M.** (2019). *Driving forces and barriers to industrial energy efficiency: A comprehensive review*. Energies, 12(1), 1-25.
26. **Backlund, S., Thollander, P., & Ottosson, M.** (2012). *Extending the energy efficiency gap*. Energy Policy, 51, 392-396.
27. **Cagno, E., Worrell, E., & Trianni, A.** (2013). *A novel approach for barriers to industrial energy efficiency*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 19, 290-308.

Apéndice A

Anexos

A.1. Anexo A: Procedimiento Completo del SIGE Desarrollado

A.1.1. Política Energética (Modelo Genérico)

Política Energética de [Nombre de la Organización]

La [Nombre de la Organización] se compromete a mejorar continuamente su desempeño energético mediante la implementación y mantenimiento de un Sistema de Gestión de la Energía. Esta política proporciona el marco para establecer y revisar objetivos y metas energéticos.

1. **Compromiso con la Mejora Continua:** Nos comprometemos a mejorar continuamente nuestro desempeño energético mediante la implementación de mejores prácticas, tecnologías eficientes y la optimización de nuestros procesos.
2. **Cumplimiento Legal:** Nos comprometemos a cumplir con todos los requisitos legales y otros requisitos que suscribamos relacionados con los usos y el consumo de la energía.
3. **Diseño y Adquisiciones:** Consideraremos el desempeño energético como un criterio fundamental en el diseño de nuevos procesos, equipos e instalaciones, así como en la adquisición de productos y servicios.
4. **Establecimiento de Objetivos:** Estableceremos, implementaremos y mantendremos objetivos y metas energéticos documentados, medibles y consistentes con esta política.
5. **Asignación de Recursos:** Asignaremos los recursos necesarios para lograr los objetivos y metas energéticos, incluyendo personal capacitado, infraestructura adecuada y financiamiento apropiado.
6. **Comunicación y Concienciación:** Esta política será comunicada a todas las personas que trabajan bajo control de la organización y estará disponible para el público. Fomentaremos una cultura de uso eficiente de la energía entre todos nuestros colaboradores.
7. **Revisión Continua:** Revisaremos esta política periódicamente para asegurar su

continua pertinencia y adecuación.

Contextualización Sectorial:

- **Para sector industrial:** 'Optimizaremos la relación [kWh/unidad de producto] en nuestros procesos productivos principales'.
- **Para sector edilicio:** 'Equilibraremos eficiencia energética con confort térmico-lumínico de los ocupantes'.
- **Para sector servicios:** 'Minimizaremos el consumo energético por [unidad de servicio] manteniendo la calidad del servicio'.

A.1.2. Formatos de Registro

Cuadro A.1: Registro de Revisión Energética

USE	LBEn	IDEn	Responsable

Cuadro A.2: Ficha de Oportunidad de Mejora

ID OM	
Descripción	
USE Afec- tado	
Ahorro Es- timado	
Inversión Estimada	
PRI	
Prioridad	
Estado	

A.2. Anexo B: Factores de Emisión Utilizados

A.2.1. Metodología de Cálculo

La huella de carbono se calculó siguiendo la metodología del GHG Protocol:

$$HC = \sum (CE_i \times FE_i) \quad (A.1)$$

Donde:

- HC = Huella de Carbono total [kg CO₂-eq].
- CE_i = Consumo energético del combustible i [kWh].
- FE_i = Factor de emisión del combustible i [kg CO₂-eq/kWh].

A.2.2. Factores de Emisión Aplicados

Cuadro A.3: Factores de Emisión Aplicados

Combustible	Factor de Emisión	Fuente
Gas Natural	0.202 kg CO ₂ -eq/kWh	IPCC 2021
Electricidad (Argentina)	0.320 kg CO ₂ -eq/kWh	IEA 2020
Diésel	0.267 kg CO ₂ -eq/kWh	IPCC 2021

A.3. Anexo C: Fichas Técnicas de las Oportunidades de Mejora

A.3.1. OM-1: Recuperador de Calor en Pasteurizador

- **Tecnología:** Intercambiador de calor de placas.
- **Eficiencia esperada:** 75-85 %.
- **Reducción de emisiones:** 15-20 %.
- **Mantenimiento requerido:** Limpieza semestral.
- **Vida útil:** 15 años.
- **Requisitos de espacio:** Mínimo, instalación en línea.
- **Compatibilidad:** Con sistemas de limpieza CIP existentes.
- **Proveedores locales:** 3 proveedores identificados.
- **Garantía:** 2 años estándar del equipo.

A.3.2. OM-4: Recambio a Iluminación LED

- **Vida útil:** 50,000 horas.
- **Eficiencia:** 120-150 lm/W.
- **Reducción consumo:** 60-70 % vs fluorescentes.
- **Retorno de inversión:** 1.5-2.5 años.
- **IRC (Color Rendering Index):** >80.
- **Temperatura color:** 4000K (neutra).
- **Compatibilidad atenuación:** Opcional con controladores específicos.
- **Disposición final:** Reciclaje de componentes electrónicos.

- **Incentivos disponibles:** Posibles créditos fiscales provinciales.

A.4. Anexo D: Tablas de Datos de Consumo

Cuadro A.4: Consumos Energéticos Mensuales - Caso Pasteurización

Mes	Gas (m ³)	Electricidad (kWh)	Producción (litros)
Enero	6,200	3,750	125,000
Febrero	5,800	3,450	115,000
Marzo	6,500	3,900	130,000
Abril	6,100	3,680	122,000
Mayo	6,300	3,820	126,000
Junio	6,000	3,600	120,000
Julio	5,900	3,550	118,000
Agosto	6,400	3,880	128,000
Septiembre	6,250	3,780	125,000
Octubre	6,350	3,840	127,000
Noviembre	6,100	3,690	122,000
Diciembre	5,700	3,420	114,000
Total	73,600	44,360	1,472,000

Cuadro A.5: Consumos Eléctricos Mensuales - Caso Edificio

Mes	Consumo (kWh)	GD Calef.	GD Ref.
Enero	16,500	280	15
Febrero	15,200	240	20
Marzo	14,800	180	35
Abril	13,500	120	50
Mayo	12,200	80	65
Junio	11,800	60	80
Julio	11,500	50	95
Agosto	12,000	55	90
Septiembre	13,000	90	70
Octubre	14,200	130	45
Noviembre	15,500	200	30
Diciembre	16,300	260	20
Total	166,500	1,745	615

A.5. Anexo E: Ejemplo Numérico Simplificado de Equilibrio de Nash

A modo de ejemplo ilustrativo (no calibrado), se presenta una matriz de pagos simplificada para dos empresas que deciden invertir (I) o no invertir (N) en eficiencia energética. La estructura refleja una situación tipo “free rider”: cuando una empresa invierte, parte de los beneficios sistémicos (externalidades positivas) también alcanzan a la que no invierte, incentivando la no cooperación.

Cuadro A.6: Matriz de pagos ilustrativa (Empresa A, Empresa B)

Empresa A	Empresa B	
	Invierte (I)	No invierte (N)
Invierte (I)	(105, 105)	(98, 108)
No invierte (N)	(108, 98)	(100, 100)

En este ejemplo, el equilibrio de Nash es (N,N): si B elige N, A prefiere N ($100 > 98$); si B elige I, A también prefiere N ($108 > 105$). Sin embargo, (I,I) resulta colectivamente superior a (N,N), representando el equilibrio ineficiente discutido por Camarda (2018).