

# 150 ANIVERSARIO UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

ENERO-JULIO-2026  
REVISTA PAIME-4

**Revista de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Electrónica**  
**J. PAIME, 2025, 4**

**Revista PAIME, 4 JULIO 2026**  
[\*\*https://www.uni75paime.org/\*\*](https://www.uni75paime.org/)

Documento electrónico disponible en:

[\*\*https://www.uni75paime.org/actual\*\*](https://www.uni75paime.org/actual)

Creada por el Comité Editorial, formado por Ex-alumnos del Programa Académico de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (PAIME) Promoción 1975 UNI, Lima, Perú.

*Comité Editorial*

*Dr. JORGE M SEMINARIO*

*Ing. SAUL RODRIGUEZ ASTUCURI*

*Ing. RUBEN GOMEZ SANCHEZ*

*Ing. ENRIQUE SALAZAR JARAMILLO*

*Ing. ROSA MARIA DELGADO VASQUEZ*

# ÍNDICE

JULIO 2026

Prólogo

4

**Entre Singapur y Róterdam:**

6

**¿Cuál es el Futuro del Puerto Inteligente de Chancay?.**

[https://doc.uni75paime.org/Entre\\_Singapur\\_y\\_Roterdam\\_Futuro\\_Chancay.pdf](https://doc.uni75paime.org/Entre_Singapur_y_Roterdam_Futuro_Chancay.pdf)

**Desarrollo de Habilidades Blandas con el apoyo del Coaching Sistémico y hábitos operativos buenos**

18

[https://doc.uni75paime.org/Desarrollo\\_Habilidades\\_Blandas.pdf](https://doc.uni75paime.org/Desarrollo_Habilidades_Blandas.pdf)

**Gemelos digitales del corazón: un ecosistema para el desarrollo de prototipos**

27

[https://doc.uni75paime.org/Digital\\_Twins\\_for\\_Health.pdf](https://doc.uni75paime.org/Digital_Twins_for_Health.pdf)

**Exceso y Deficiencia de Vitamina B12: Consecuencias Clínicas e Interacciones Antioxidantes con el Glutathión**

52

[https://doc.uni75paime.org/Vitamina.B12-Masciarelli\\_v5.pdf](https://doc.uni75paime.org/Vitamina.B12-Masciarelli_v5.pdf)

**Aplicación de selectividad lógica y protección adaptativa para una red de media tensión hospitalaria**

61

[https://doc.uni75paime.org/Aplicacion\\_de\\_selectividad\\_logica\\_y\\_proteccion\\_adapativa\\_MT.pdf](https://doc.uni75paime.org/Aplicacion_de_selectividad_logica_y_proteccion_adapativa_MT.pdf)

# PRÓLOGO

**E**n los últimos años, el campo de la ingeniería ha experimentado un crecimiento notable. La mecánica, la electricidad y la electrónica han liderado constantemente el camino, impulsando avances en disciplinas relacionadas.

Sin embargo, este progreso no se limita únicamente a la ingeniería. Se alinea con los avances continuos en los fundamentos de la ciencia y filosofía, transformando el conocimiento teórico en aplicaciones prácticas que benefician a nuestra comunidad y al medio ambiente.



Presentamos el tercer número de nuestra revista digital, dedicada tanto a la ingeniería como a la ciencia. Nuestra misión es compartir nuestra visión, experiencias y los avances recientes con profesionales y estudiantes por igual.

Esperamos que esta plataforma inspire nuevas iniciativas, respaldadas por financiación gubernamental, colaboración universitaria y asociaciones con la industria privada. Al hacerlo, nuestro objetivo es impulsar



la adopción de tecnologías modernas y fomentar el crecimiento de nuevos campos dentro de nuestra comunidad.

En estas páginas, profundizamos en las fortalezas y limitaciones de diversos enfoques, destacando su importancia práctica como herramientas de ingeniería esenciales. Asimismo, invitamos al envío de artículos de investigación, revisión y perspectivas.

Extendemos nuestro sincero agradecimiento a los autores que contribuyeron a este cuarto número. Su trabajo prepara el escenario para la celebración del 150 aniversario de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) en Lima, Perú.



*El Comité Editorial*



<https://www.uni75paime.org/>

## Entre Singapur y Róterdam: ¿Cuál es el Futuro del Puerto Inteligente de Chancay?

Mg. Rosa María Delgado Vásquez

Citar: J. PAIME, 2025, 4, 6-17

Ginebra, 5 de Setiembre 2025

### Resumen

**Chancay representa mucho más que un puerto:** es una oportunidad histórica para construir desde cero una ciudad inteligente, sostenible y conectada, diseñada para integrarse a las cadenas logísticas globales. Con visión estratégica, inversión en talento, alianzas sólidas y políticas públicas alineadas, el Perú puede liderar un nuevo paradigma en infraestructura tecnológica, comparable con los legendarios puertos de Singapur o Róterdam, pero con identidad propia: un modelo peruano de desarrollo inteligente y sostenible. En un mundo impulsado por datos, inteligencia artificial (IA), blockchain y automatización, **Chancay puede convertirse en el primer hub digital del Pacífico Sur:** un puerto-ciudad inteligente concebido para competir en la era de la IA y las cadenas logísticas globales. Esta es una oportunidad para que la región pase de ser consumidora de tecnología a creadora de futuro. No es solo un reto logístico, sino también de soberanía tecnológica, innovación y liderazgo regional. **El momento de actuar es ahora.**

### Summary

**Chancay represents far more than just a port:** it is a historic opportunity to build from the ground up a smart, sustainable, and connected city, designed to integrate seamlessly into global supply chains. With strategic vision, investment in talent, strong alliances, and aligned public policies, Peru can lead a new paradigm in technological infrastructure, comparable to the legendary ports of Singapore or Rotterdam, yet with its own identity: a Peruvian model of smart and sustainable development. In a world driven by data, artificial intelligence (AI), Blockchain, and automation, **Chancay can become the first digital Hub of the South Pacific:** an intelligent port-city conceived to compete in the era of AI and global logistics networks. This is an opportunity for the region to move from being a consumer of technology to a designer of the future. It is not only a logistical challenge, but also one of technological sovereignty, innovation, and regional leadership. **The time to act is now.**

**Keywords:** Chancay, Singapur, Róterdam, ciudad inteligente, puerto inteligente, bioceánico, inteligencia artificial (IA), blockchain y automatización

### 1. Introducción

Vivimos una era de transformación geopolítica, económica y tecnológica. En América Latina el acceso a Internet se duplicó en la última década y surgieron ecosistemas de comercio electrónico y fintech pero, sigue rezagada en infraestructura y adopción tecnológica. La región ha avanzado en conectividad, digitalización y automatización, pero aún no lidera. La gran pregunta es: ¿Puede América Latina liderar la próxima revolución tecnológica? Y puede el Perú, con proyectos estratégicos como el Puerto de Chancay, Puerto del Callao o el Aeropuerto Jorge Chávez, ¿convertirse en catalizador de un nuevo modelo de desarrollo digital en la región?

En los próximos años, el puerto inteligente de Chancay —ubicado en la costa central del Perú— podría reconfigurar la posición estratégica de América Latina en el comercio global. Concebido

como un puerto de última generación, altamente automatizado y orientado hacia el eje transoceánico Asia–Pacífico, Chancay no es solo un nuevo nodo logístico: es una apuesta geopolítica, tecnológica y económica de gran escala. Pero ¿puede realmente competir con colosos como los Puertos de Róterdam y Singapur? Para responder a esta pregunta, es necesario ir más allá de las cifras y explorar los factores estructurales para convertirse en el eje de una nueva geografía económica, que hoy definen el éxito del '**puerto-ciudad**' propio del siglo XXI.

## 2. Antecedentes

El puerto inteligente de Chancay aspira a posicionarse al nivel de referentes globales con décadas de liderazgo. Ejemplos como **Róterdam y Singapur** demuestran que un puerto puede trascender su función operativa para convertirse en un verdadero ecosistema logístico, industrial y tecnológico de nueva generación: altamente integrado, resiliente e impulsado por una visión estratégica sostenida en el tiempo, que refleja la identidad, la cultura y las capacidades de sus regiones.

### Róterdam



Fig. 1 – Puerto de Róterdam

**Róterdam**, el mayor puerto de Europa, está interconectado por trenes, ríos, autopistas y oleoductos con todo el continente. Integra zonas industriales, centros de datos y una ciudad inteligente orientada al desarrollo logístico de alto valor añadido. Maasvlakte, una gran expansión artificial ganada al mar consolidó el rol del Puerto de Róterdam como Hub logístico europeo. La primera fase se inauguró en 1970 y la segunda en 2013 (Fig. 1).

### Singapur

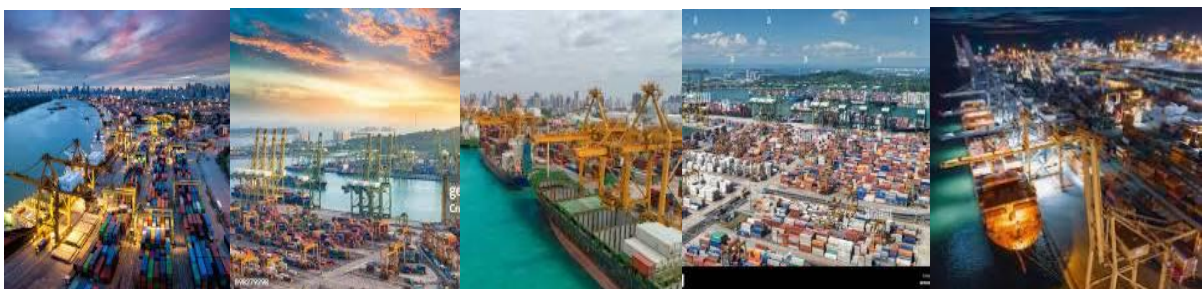


Fig. 2 - Puerto de Singapur

**Singapur** en Asia, representa el estándar mundial de automatización y eficiencia portuaria. Su nuevo puerto de Tuas —totalmente automatizado— se integra con parques industriales, zonas francas, IA y una infraestructura digital de primer nivel (Fig 2).

El éxito de **Róterdam y Singapur** no fue casual: respondió a décadas de inversión sostenida, planificación territorial, interoperabilidad logística y una visión de Estado clara, que transformó a sus puertos en motores del desarrollo nacional.

En América del Sur, varios puertos están evolucionando hacia modelos más inteligentes, incorporando automatización logística, fortaleciendo el comercio e impulsando la modernización urbana. Entre los más destacados se encuentran Santos y São Paulo en Brasil, Buenos Aires en Argentina, Santiago en Chile, Callao y Chancay en Perú.

### 3. Chancay: Estado Actual

Chancay tiene una oportunidad histórica de construir una ciudad portuaria del siglo XXI, libre de errores urbanos del pasado y con un enfoque centrado en la innovación y la sostenibilidad.

#### Capacidad Técnica Actual y Proyectada

Característica	Chancay, PE	Róterdam, NL	Singapur
<b>Estado general</b>	En construcción / Fase 1 operativa 2024-2025	Totalmente operativo, expansión continua	Totalmente operativo, en transición a Tuas
<b>Capacidad actual de TEUs <sup>1</sup></b>	Proyectada: 1.5 – 2 millones (Fase 1)	+15 millones TEUs	+37 millones TEUs (2023)
<b>Profundidad</b>	~18 metros. Muelles multipropósito y contenedores	Hasta 24 metros (Maasvlakte 2)	Hasta 20 metros (Puerto de Tuas)
<b>Área total</b>	+1,000 ha (plan maestro)	+12,500 ha	~3,200 ha

Fig. 3

#### Nivel Actual de Automatización

Elemento	Chancay	Róterdam	Singapur
<b>Grúas automatizadas</b>	Sí - Ggrúas Ship-to-Shore (STS) <sup>3</sup> y Rail-Mounted Gantry (RMG) <sup>4</sup> . 100% automatizadas.	Sí - Ej. APMT Maasvlakte 2 -Terminal de contenedores de APM Terminals, <sup>5</sup> 100% automatizada.	Sí - Puerto Tuas será 100% automatizado.
<b>Vehículos AGV <sup>2</sup> (sin conductor)</b>	Si – Previsto.	Sí - Pruebas en varios terminales	Sí - Pruebas desde 2018.
<b>Gestión portuaria digital</b>	Prevista con plataformas integradas.	Sí - Portbase: plataforma nacional de datos.	Sí - SGTradeX: agiliza trámites y decisiones <sup>6</sup> . NextGen Port <sup>7</sup> - automatización, energías limpias y eficiencia operativa.
<b>Inteligencia Artificial</b>	En diseño - Gestión logística futura.	En uso para predicción y logística.	En uso para predicción y optimización.

Fig. 4

#### Servicios Actualmente Ofrecidos

Servicios/Infraestruct	Chancay	Róterdam	Singapur
<b>Contenedores</b>	Sí - Terminales automatizados.	Sí - Terminales, como APM, ECT, etc. <sup>8</sup>	Sí - Altamente optimizado.
<b>Granel / Carga general</b>	Sí – Multipropósito	Sí	Sí

<b>Zonas logísticas e industriales</b>	En desarrollo - Zona Logística e Industrial Portuaria.	Sí - Maasvlakte y Europort.	Sí - Jurong Island, zonas francas.
<b>Aduanas y servicios digitales</b>	Previsto digital e integrado	Completamente digitalizados	Avanzado, con blockchain y AI
<b>Intermodalidad</b>	Conexión carretera-ferroviaria, Tren bioceánico (proyecto a futuro)	Ferrocarril, barcasas, autopistas, oleoductos	Ferrocarril, conexión aérea, flota marítima

Fig. 5

**Nota:** Para mayor detalle sobre los términos **1 al 8**, consulte la **Sección 12 – Conceptos Técnicos Clave**.

#### 4. Chancay: SWOT análisis

Chancay representa una apuesta estratégica de alto impacto para el Perú. Su éxito o fracaso definirá si se consolida como un nuevo eje logístico regional o si se convierte en una oportunidad perdida dentro del comercio global. Hoy, el mayor desafío no es el tecnológico, sino político e institucional. El éxito del puerto dependerá de la capacidad del Estado para construir el ecosistema que lo haga viable.

Este análisis SWOT del Puerto Inteligente de Chancay, ha sido elaborado a partir de su situación actual y de las proyecciones a corto y mediano plazo.

#### Análisis SWOT de Chancay

Fortalezas	Oportunidades
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puerto de última generación (ULVC &gt; 18.000 TEU)</li> <li>• Inversión estratégica de COSCO Shipping</li> <li>• Hub logístico y digital proyectado</li> <li>• Integración a la Ruta de la Seda</li> <li>• Ubicación estratégica transpacífica</li> <li>• Diseño desde 'cero' sin limitaciones</li> <li>• Puerto-ciudad inteligente y automatizada</li> <li>• Cercanía a Lima, mercados andinos y región</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hub logístico líder en Sudamérica</li> <li>• Atracción de inversión extranjera directa</li> <li>• Desarrollo de Una ciudad portuaria inteligente</li> <li>• Innovación: IA, blockchain y trazabilidad</li> <li>• Alternativa al Canal de Panamá</li> <li>• Parques industriales y logísticos</li> <li>• Integración digital: trazabilidad y logística predictiva.</li> </ul>
Debilidades	Amenazas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dependencia de inversión china (COSCO)</li> <li>• Operación bajo control extranjero</li> <li>• Marco regulatorio frágil e inestable</li> <li>• Déficit en carreteras, trenes y energía</li> <li>• Gobernanza fragmentada y sin visión</li> <li>• Conflictos socioambientales latentes</li> <li>• Riesgo de enclave aislado sin integración</li> <li>• Baja articulación regional y bioceánica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ciberataques en puerto digital</li> <li>• Competencia de puertos regionales</li> <li>• Tensiones geopolíticas entre China y EE.UU.</li> <li>• Riesgos regulatorios y ambientales</li> <li>• Dependencia tecnológica externa</li> <li>• Desaceleración del comercio global</li> <li>• Conflictos sociales que retrasen obras</li> <li>• Riesgos macroeconómicos globales</li> </ul>

Fig. 6

## 5. Chancay: Hub Logístico Regional

Chancay tiene el potencial de transformar las rutas comerciales del Pacífico Sur y consolidarse como un **Hub logístico regional de clase mundial**. Para lograrlo, debe ir más allá del simple embarque y desembarque de contenedores: requiere una infraestructura urbana e industrial moderna, integrada y resiliente, capaz de potenciar exponencialmente su liderazgo.

Las piezas clave para lograrlo son:

### 5.1. Ciudad Portuaria Inteligente

Una ciudad portuaria inteligente no es solo una extensión urbana junto al puerto. Es una **infraestructura viva**, interconectada y altamente tecnológica que maximice el impacto logístico, económico, social y ambiental del territorio portuario. Chancay tiene la oportunidad histórica de convertirse en la primera ciudad portuaria inteligente de Sudamérica, donde se movilicen conocimiento, tecnología, talento, sostenibilidad, empleos de calidad, innovación y no solamente contenedores.

Debe Incluir en el Planeamiento Urbanístico	
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Tecnología y conectividad digital avanzada:</b> Redes 5G, IA, Internet de las Cosas (IoT), Blockchain, sensores urbanos, automatización, centros de datos, plataformas de gestión inteligente para movilidad, energía, residuos y servicios urbanos.</li> <li>• <b>Centros de innovación, formación, técnica especializada y transferencia tecnológica:</b> Universidades técnicas, institutos, parques industriales tecnológicos, hubs de logística, ciberseguridad e industria 4.0.</li> <li>• <b>Vivienda digna y servicios urbanos sostenibles:</b> Transporte público, energía limpia y gestión inteligente de agua y residuos, enfocados en los trabajadores y sus familias.</li> <li>• <b>Gestión ambiental automatizada:</b> Sensores en tiempo real para mejorar la calidad de aire, agua, emisiones y reciclaje portuario.</li> <li>• <b>Movilidad sostenible:</b> Trenes, buses eléctricos y trazabilidad de trenes, trazabilidad logística y conexión eficiente y segura entre el puerto, barrios y zonas industriales.</li> <li>• <b>Gobernanza digital</b> integración de datos en tiempo real para tomar decisiones urbanas inteligentes.</li> </ul>
Ejemplos Internacionales	
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Singapur:</b> Combina su puerto automatizado con distritos inteligentes como <i>Punggol Digital District</i>, integrando universidades, startups y centros logísticos.</li> <li>• <b>Róterdam:</b> Ha desarrollado iniciativas como <i>SmartPort</i> y el distrito <i>M4H (Merwe-Vierhavens)</i>, donde se incuban tecnologías marítimas sostenibles con universidades y empresas.</li> <li>• <b>Busan, Corea del Sur:</b> La <i>Busan Eco Delta Smart City</i> es una ciudad conectada al puerto, con enfoque en IA, robótica urbana y logística verde.</li> </ul>

Fig. 7

### 5.2. Parque Industrial Tecnológico Portuario (PITP)

El PITP representa una infraestructura estratégica destinada a consolidar un ecosistema logístico, tecnológico y productivo de alto impacto. Este proyecto no se limita a las funciones tradicionales de un parque industrial, sino que incorpora plataformas tecnológicas avanzadas y servicios logísticos de clase global, concebidos para atraer industrias innovadoras, empresas tecnológicas y centros de desarrollo. Su propósito es transformar mercancías, añadir valor a los productos primarios —que aún constituyen gran parte de las exportaciones nacionales— generar empleo de calidad y atraer inversiones que integren al Perú de manera más sólida en las cadenas productivas globales.

Con ello, el PITP se convierte en un catalizador para la transición del país hacia una economía moderna, industrializada y competitiva. La ubicación del PITP será decisiva. Situarlo en las

inmediaciones del Puerto Inteligente de Chancay o, en la ciudad de Ancón, a 60 km al norte por la carretera Panamericana Norte, abriría la oportunidad de extender su impacto hacia diversas regiones. De esta forma, el PITP no solo complementaría la operación portuaria, sino que proyectaría al Perú como un nuevo eje de desarrollo industrial y tecnológico en Sudamérica.

Debe Incluir	
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Centros de <b>innovación logístico</b> e industrial.</li> <li>Plataformas de <b>ensamblaje, etiquetado, empaque y trazabilidad digital</b>.</li> <li>Laboratorios de <b>I+D+I</b> en movilidad eléctrica, comercio electrónico, energía, blockchain logístico, automatización y transformación productiva. Estos requieren de profesionales calificados de universidades con títulos de máster o doctorados en las diferentes áreas industriales.</li> <li>Centros <b>educativos y técnicos</b>, programas de formación y capacitación continua en IA, ciberseguridad, tecnologías disruptivas, comercio exterior, operación y mantenimiento de sistemas portuarios automatizados.</li> </ul>
Ejemplos internacionales	
2	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>ZAL Barcelona:</b> Conectado al puerto de Barcelona, es un clúster logístico-tecnológico de alto valor añadido, que incorpora soluciones tecnológicas para maximizar la eficiencia del transporte multimodal.</li> <li><b>Jebel Ali Free Zone (JAFZA), Dubái:</b> Parque industrial portuario donde empresas transforman y exportan productos de alto valor agregado, bajo una normativa ágil y favorable a la inversión extranjera, y en articulación con DP World.</li> </ul>

Fig. 8

### 5.3 El Tren Bioceánico: Conectividad Estratégica Continental

El Corredor Ferroviario Bioceánico Central es uno de los proyectos de infraestructura más ambiciosos de Sudamérica, con más de 3,700 km de vías férreas. El 8 de julio de 2025, Brasil y China firmaron un acuerdo para evaluar la viabilidad de esta línea que conectará el puerto brasileño de Ilhéus, en el Atlántico, con el megapuerto peruano de Chancay, en el Pacífico. Esta conexión daría a Chancay acceso directo al Atlántico, consolidándolo como puerta de entrada y salida entre Asia y Sudamérica, y como nodo logístico estratégico del Pacífico Sur. El proyecto, impulsado por Brasil, China y Perú, enfrenta desafíos técnicos, financieros y políticos, así como tensiones geopolíticas vinculadas a la creciente presencia de China en la región, discrepancias entre los países involucrados sobre el trazado, la financiación, y la gobernanza del corredor. Su éxito dependerá de que se configure como un corredor verdaderamente multilateral, basado en integración regional, estándares comunes y gobernanza compartida. De lograrse, el Tren Bioceánico no solo unirá dos océanos, sino que también podría transformar la geografía económica de Sudamérica (Fig. 9)

### 5.4 Ruta de la Seda: Chancay Nodo Emergente del Pacífico Sur

Chancay, integrado a la Ruta Marítima y Digital de la Seda impulsada por China, adquiere un rol estratégico en el nuevo mapa geopolítico, sin precedentes y reforzando la presencia de China en la región. La participación de COSCO Shipping (60% del proyecto) puede atraer inversiones clave, pero también plantea desafíos diplomáticos y tecnológicos que el Perú debe gestionar con visión y soberanía. Con la salida de Panamá de esta iniciativa, Chancay podría convertirse en una alternativa al Canal de Panamá, reduciendo hasta en 21 días las rutas hacia Asia. El Perú debe garantizar gobernanza, equilibrio diplomático y control tecnológico frente a esta oportunidad (Fig. 10).



Fig. 9 - Corredor Ferroviario Bioceánico



Fig 10 - Ruta de la Seda

## 6. La Inteligencia Artificial (IA) Transforma Puertos y Ciudades Marítimas

La IA transforma radicalmente los puertos y ciudades marítimas del mundo, convirtiéndolos en sistemas más eficientes, autónomos e inteligentes. Sin embargo, su adopción requiere no solo inversión tecnológica, sino visión estratégica, políticas inclusivas y regulación sólida. En ese equilibrio está el futuro del desarrollo portuario en América Latina y el mundo. En IA, el Perú debería ser más ambicioso.

### Transformación Portuaria y Marítima: Ventajas en la Era de la IA

1	<b>Optimización logística</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Predicen flujos de carga, optimizan tiempos de atraque y rutas.</li> <li>Reducción de congestión portuaria y tiempos de espera.</li> </ul>
2	<b>Automatización de operaciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Grúas, vehículos y almacenes inteligentes operan con mínima intervención humana.</li> <li>Aumento en la seguridad laboral y reducción de costos operativos.</li> </ul>
3	<b>Gestión inteligente - tráfico marítimo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Facilita el control del tráfico de buques y previene colisiones mediante análisis en tiempo real.</li> </ul>
4	<b>Mantenimiento predictivo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sensores conectados a IA anticipan fallas en equipos e infraestructura, reduciendo tiempos muertos y costos de reparación.</li> </ul>
5	<b>Sostenibilidad ambiental</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mejora la eficiencia energética y reduce emisiones gracias a algoritmos que optimizan el uso de recursos</li> </ul>
6	<b>Planificación urbana y portuaria</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ayuda a diseñar ciudades marítimas inteligentes basadas en datos: movilidad, seguridad y servicios urbanos.</li> </ul>
7	<b>Blockchain App - TradeLens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Seguimiento seguro, transparente y en tiempo real de contenedores y documentos logísticos, a lo largo de toda la cadena de suministro global.</li> </ul>

Fig. 11

### Puertos y Ciudades Inteligentes: Riesgos en la Era de la IA

1	<b>Dependencia tecnológica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Una infraestructura hiperconectada puede volverse vulnerable ante fallos técnicos o proveedores extranjeros no confiables o ataques cibernéticos.</li> </ul>
2	<b>Desigualdad territorial</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La implementación desigual de IA puede acentuar brechas entre regiones con alta tecnología y zonas portuarias tradicionales.</li> </ul>
3	<b>Gobernanza algorítmica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Decisiones críticas tomadas por sistemas automatizados requieren marcos éticos, legales y de supervisión robustas.</li> </ul>
4	<b>Desempleo y reconversión laboral</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La automatización puede desplazar empleos tradicionales si no se acompaña de programas de reentrenamiento.</li> </ul>

Fig. 12

## 7. Ciberseguridad: Pilar crítico en la Era de la IA

En un entorno cada vez más automatizado e interconectado, la ciberseguridad **no es una opción: es un imperativo estratégico**. Puertos inteligentes, diseñados con IA, automatización, y flujos logísticos digitales, enfrentan riesgos cibernéticos que podrían paralizar operaciones, comprometer datos críticos y generar consecuencias económicas y geopolíticas críticas. Ninguna

infraestructura digital está a salvo sin una arquitectura de ciberseguridad robusta. Un solo incidente podría interrumpir cadenas globales de suministro, causar pérdidas multimillonarias y erosionar la confianza internacional. Proteger digitalmente a Chancay no es solo una cuestión técnica: es garantizar soberanía, competitividad y legitimidad como nodo confiable en las cadenas logísticas globales. Si Chancay aspira a ser un eje estratégico del Pacífico Sur, debe defenderse con la misma firmeza en el ciberespacio como en el territorio físico, desde el día 1 de su concepción.

### Blindar Chancay: Prioridad Nacional

1	<b>Diseñar</b>	<b>Ciberseguridad</b> desde el origen (by design), no como un parche reactivo.
2	<b>Fomentar</b>	<b>Coordinación activa</b> entre el Estado, fuerzas armadas, operadores portuarios y empresas tecnológicas.
3	<b>Establecer</b>	<b>Centros de Respuesta ante Incidentes (CSIRT)</b> especializados en infraestructura crítica.
4	<b>Invertir</b>	<b>Sostenidamente en talento especializado</b> y realizar simulacros regulares de ciberdefensa.
5	<b>Promulgar</b>	<b>Políticas públicas</b> , normas técnicas, programas de capacitación continua y mecanismos de supervisión rigurosos.

Fig. 13

## 8. Futuro de Chancay

Chancay representa la apuesta portuaria más ambiciosa de la costa pacífica sudamericana: un puerto de gran calado, muelles de última generación y conexión terrestre que puede convertir al Perú en la principal puerta de entrada a Asia para commodities y contenedores de la región.

Con el 60 % de participación de COSCO Shipping, el puerto atrae capital y tecnología de punta, siempre que el Estado peruano asegure un marco de gobernanza equilibrado y soberano. Su ventaja estratégica es clara: reducir hasta en 21 días las rutas actuales transpacíficas hacia Asia, lo que lo proyecta como alternativa al Canal de Panamá y potencial Hub logístico del Pacífico Sur.

Integrado a la Ruta Marítima y Digital de la Seda impulsada por China, Chancay se perfila como pieza clave en el nuevo mapa geopolítico mundial. Sin embargo, su éxito dependerá de la capacidad del Perú para gestionar con visión estratégica los retos tecnológicos, ambientales y diplomáticos que implica.

Diseñado desde 'cero' en un terreno virgen, el proyecto abre la oportunidad de desarrollar un puerto-ciudad inteligente de nueva generación, basado en automatización, inteligencia artificial, energías limpias y digitalización. Pero, su consolidación requiere de infraestructuras urbanas, industriales e intermodales modernas que eviten el riesgo de un enclave aislado.

La formación de profesionales peruanos en competencias digitales, tecnológicas (IA, IoT, Blockchain) y de gestión debe ser prioritaria, articulando al Estado, la academia y el sector privado. Solo con talento local capacitado Chancay podrá convertirse en el motor de transformación para el Perú.

### Puerto de Chancay



Fig. 14 – Puerto de Chancay

### Evolución futura: Visión estratégica

	Evolución futura
<b>Aspiración</b>	Convertirse en un <b>Hub logístico</b> de última generación, diseñado específicamente para los flujos comerciales del siglo XXI, con enfoque transpacífico entre Sudamérica y Asia.
<b>Infraestructura</b>	<b>Automatización total, IA, digitalización</b> de procesos, energías limpias, transporte intermodal y ciberseguridad avanzada.
<b>Grandes desafíos</b>	Consolidar la <b>intermodalidad</b> (carretera, ferrocarril y servicios digitales) y construir un ecosistema portuario inteligente, sostenible, productivo y seguro, capaz de atraer inversión, generar empleo de calidad y posicionarse como nodo estratégico de valor agregado en la región. Mas aun, el <b>talento local altamente capacitado</b> no es una opción, es un imperativo.

Fig. 15

### Hub Portuario Automatizado: Transformará el Futuro del País

Dimensión	Chancay	Róterdam	Singapur
<b>Rol regional</b>	<b>Hub estratégico</b> entre el Atlántico y el Pacífico, conectando Sudamérica con Asia	Hub intermodal <b>clave de Europa</b> y articulador del comercio global	Hub logístico global entre <b>Asia, Europa y África</b> , con infraestructura de clase global y alta integración digital.
<b>Sostenibilidad/Energía</b>	Prevista: energía eléctrica, agua reciclada	Descarbonización (hidrógeno, electrificación)	Transición verde, puerto inteligente
<b>Ciudad Portuaria/Smart City</b>	Proyecto de puerto y ciudad marítima inteligente	Ciudad portuaria de avanzada	Integración con la ciudad inteligente (SG)
<b>Integración con China</b>	Alta (Cosco Shipping y Ruta de la Seda)	Media (inversión limitada)	Alta (alianzas estratégicas)

Fig. 16

### Síntesis comparativa

Puerto	Ventaja Principal	Desafío Principal
<b>Chancay</b>	Diseñado desde cero con tecnologías modernas	Escala inicial limitada y falta de intermodalidad
<b>Rotterdam</b>	Intermodalidad y eficiencia logística integradas	Saturación y transición energética costosa
<b>Singapur</b>	Volumen, automatización y centralidad global	Espacio limitado, depende del comercio global

Fig. 17

## 9. *Conclusión*

Chancay no debe concebirse solo como un puerto inteligente, sino como un Hub logístico y transformador de la región, capaz de articular cadenas productivas con valor agregado y generar un impacto sostenible. Para lograrlo, es imprescindible una infraestructura integral —incluida la ferroviaria— acompañada de una gobernanza estable, transparente y atenta a los riesgos sociales y ambientales. Chancay debe convertirse en ese motor para el Perú y América Latina, si se construye con visión de futuro basada en tecnología de punta, conectividad y desarrollo humano. Los grandes puertos del mundo como Singapur, Róterdam o Shanghái no son simples terminales de carga: son ecosistemas inteligentes que generan empleo de calidad, impulsan innovación y elevan la competitividad de sus regiones. El Perú no puede quedarse al margen: las decisiones políticas, tecnológicas y la calidad de la ejecución de infraestructura en los próximos cinco años serán determinantes. El Corredor Ferroviario Bioceánico, una de las obras más ambiciosas del continente, ofrece una oportunidad histórica para consolidar a Chancay como el gran Hub del Pacífico Sur. El reto es enorme, pero la oportunidad lo es aún más. **El momento de actuar es ahora.**

### 10. Recomendación

Chancay debe consolidarse como un ecosistema logístico-tecnológico de última generación. Para ello, se proponen acciones diferenciadas por actor y horizonte de tiempo:

Actor	Corto plazo (1–3 años)	Mediano plazo (3–7 años)	Largo plazo (7–15 años)
<b>Gobierno peruano</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Crear agencia de gobernanza portuaria público-privada.</li> <li>• Establecer marco regulatorio estable y transparente.</li> <li>• Lanzar programas de capacitación técnica (IA, IoT, blockchain, energías renovables, logística)..</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Integrar ciudad portuaria inteligente con clústeres industriales.</li> <li>• Desarrollar red intermodal (ferrocarril, carreteras, energía).</li> <li>• Establecer incentivos fiscales para industrias de valor agregado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Posicionar a Chancay como hub logístico del Pacífico Sur.</li> <li>• Liderar la integración bioceánica (Brasil-Perú).</li> <li>• Exportar modelo peruano de smart-port y smart-city en foros globales.</li> </ul>
Empresas logísticas y COSCO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Programas de empleo y capacitación local.</li> <li>• Garantizar interoperabilidad digital (APIs, trazabilidad en tiempo real).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Expandir servicios diferenciados (cadena de frío, e-commerce, mantenimiento naval).</li> <li>• Implementar estándares de sostenibilidad (ISO, carbono neutral).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Convertirse en referente de smart port en Sudamérica.</li> <li>• Integrar Chancay en la red global de puertos digitales de COSCO</li> </ul>
<b>Inversores privados y Clústeres industriales</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Apostar por energías renovables (solar, eólica, hidrógeno verde).</li> <li>• Identificar oportunidades en almacenamiento logístico y servicios auxiliares.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Crear parques industriales inteligentes vinculados al puerto.</li> <li>• Incentivar innovación local (startups logísticos, fintech, blockchain).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consolidar ecosistema industrial-tecnológico exportador.</li> <li>• Integrar cadenas de valor regionales en minería, agroindustria y manufactura.</li> </ul>
Comunidades locales y sociedad civil	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Implementar diálogo y consulta permanente.</li> <li>• Garantizar monitoreo ambiental independiente.</li> <li>• Planeamiento urbanístico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Invertir en servicios urbanos (saneamiento, salud, educación, agua).</li> <li>• Incluir a comunidades en programas de empleo, emprendimiento y educación técnica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Construir ciudad portuaria inclusiva y sostenible.</li> <li>• Generar cohesión social que legitime al hub como motor nacional.</li> </ul>

Fig. 18

## 11. Referencias

1	<b>UNCTAD (2023). <i>Review of Maritime Transport 2023</i>.</b> Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo. Proporciona análisis actualizados sobre tendencias portuarias, logística global e intermodalidad. <a href="https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2023">https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2023</a>
2	<b>DP World (2024). <i>Puerto de Chancay: Proyecto de Desarrollo Integral</i>.</b> Documento técnico presentado por DP World sobre el diseño, automatización y fases del proyecto. Consultar memorias oficiales o comunicados del proyecto en : <a href="https://www.dpworld.com">https://www.dpworld.com</a>
3	<b>CAF – Banco de Desarrollo de América Latina (2022). <i>Infraestructura para la integración física de América del Sur</i>.</b> Incluye análisis del corredor bioceánico y su impacto para países como Perú, Brasil, Bolivia y Paraguay <a href="https://www.caf.com">https://www.caf.com</a>
4	<b>OECD/ITF (2021). <i>Smart Ports: Technology Trends in Port Development</i>.</b> Revisión técnica de cómo la inteligencia artificial, IoT y automatización están transformando puertos. <a href="https://www.itf-oecd.org/smart-ports">https://www.itf-oecd.org/smart-ports</a>
5	<b>Cosco Shipping (2024)- The Inauguration Ceremony of Chancay Port Was Successfully Held</b> <a href="https://ports.coscoshipping.com">ports.coscoshipping.com</a> , <a href="https://www.ft.com/content/2024-03-28/cosco-shipping-chancay-port">Financial Times</a> .
6	<b>CEPAL (2023). <i>Panorama del Transporte en América Latina y el Caribe</i>.</b> Incluye perspectivas sobre logística, digitalización e infraestructura regional. <a href="https://www.cepal.org">https://www.cepal.org</a>

## 12. Conceptos Técnicos Clave

1	<b>Capacidad en TEUs (Twenty-foot Equivalent Units)</b> Unidad estándar que mide cuántos contenedores de 20 pies puede manejar un puerto, buque o terminal. Es clave para cuantificar el volumen de carga en el comercio marítimo internacional (Fig. 3).
2	<b>Vehículos AGV (Automated Guided Vehicles)</b> Vehículos autónomos que transportan contenedores dentro de terminales portuarias automatizadas, sin conductor humano (Fig. 4).
3	<b>Grúas STS (Ship-to-Shore)</b> Grúas que cargan y descargan contenedores entre buques y muelles. En puertos automatizados, operan de forma remota o autónoma (Fig. 4).
4	<b>Grúas RMG (Rail-Mounted Gantry)</b> Grúas montadas sobre rieles que manipulan contenedores en los patios. Pueden operar de forma completamente automatizada (Fig. 4).
5	<b>APMT Maasvlakte 2</b> Terminal de contenedores de APM Terminals en Róterdam. Es 100% automatizada, opera con energía limpia y está diseñada para emisiones directas cero (Fig. 4).
6	<b>SGTraDex (Singapore Trade Data Exchange)</b> Plataforma digital de Singapur que integra datos logísticos de todo el ecosistema portuario y comercial, facilitando decisiones y trámites en tiempo real (Fig. 4).
7	<b>NextGen Port (Singapur)</b> Estrategia nacional para desarrollar un puerto de nueva generación basado en inteligencia artificial, automatización avanzada, energías limpias y eficiencia operativa (Fig. 4).
8	<b>Terminales especializados en contenedores</b> El puerto alberga múltiples terminales con distintos niveles de automatización. <b>APM Terminals:</b> Operadora global líder, gestiona Maasvlakte 2, una terminal 100% automatizada. <b>Europe Container Terminals (ECT):</b> Opera varias terminales, como Delta y Euromax, con altos estándares tecnológicos (Fig. 5).

## Desarrollo de Habilidades Blandas con el apoyo del Coaching Sistémico y hábitos operativos buenos

José Arturo Pintado Delgado  
apintado52@gmail.com

Citar: J. PAIME, 2025, 4, 18-26  
agosto 2025

### Resumen

Este proyecto intenta demostrar que al producirse un proceso de adquisición y desarrollo de habilidades blandas utilizando como herramientas al Coaching Sistémico apoyado por principios de la naturaleza humana, su conciencia, y su relación con la realidad aplicados a los comportamientos sociales y en la empresa, producen en el cliente objetivo, un cambio trascendental ya que la adquisición de las habilidades blandas requiere la puesta en práctica de virtudes humanas que son hábitos operativos buenos. El objetivo es lograr cambios positivos en las personas que tendrán un efecto multiplicador en ellas mismas y en su entorno inmediato. Se utiliza encuestas tipo 360° en tres fases (inicial, intermedio y final) y el reporte de calificaciones en tres oportunidades (PC1, PC2 y PC3). Se espera que al final del proceso el estudiante obtenga mejores calificaciones y que los resultados de las encuestas demuestren un cambio en las principales habilidades a desarrollar, al mismo tiempo que se demuestre que la práctica de virtudes humanas trae como consecuencia desarrollo de habilidades blandas y mejores calificaciones.

**Palabras clave:** Coaching sistémico, Habilidades blandas, Educación.

### Abstract

This project tries to demonstrate that when a process of acquisition and development of soft skills occurs using Systemic Coaching as tools supported by principles of Anthropological Philosophy applied to the human person, they produce in the target client, a transcendental change since the acquisition of soft skills requires the implementation of human virtues that are good operating habits. The goal is to bring about positive changes in people that will have a multiplier effect on themselves and their immediate environment. The application of 360° surveys is used in three phases (initial, intermediate and final) and the report card in three opportunities (PC1, PC2 and PC3). It is expected that at the end of the process the student will obtain better grades and that the results of the surveys will demonstrate a change in the main skills to be developed, while at the same time demonstrating that the practice of human virtues results in the development of soft skills and better grades.

**Keywords:** Systemic Coaching, Soft skills, Education

## **1. Introducción y problema de investigación**

Este proyecto plantea que el desarrollo de habilidades blandas puede lograrse mediante el uso del Coaching Sistémico, complementado con principios de la filosofía antropológica. El objetivo principal es demostrar que estas habilidades requieren virtudes humanas, es decir, hábitos operativos buenos, y que su adquisición repercute positivamente en el entorno social y académico del estudiante. Ante una crisis ética y moral en la sociedad peruana, se plantea como solución una intervención educativa que incluya herramientas como el coaching educativo.

## **2. Fundamentación y antecedentes**

El coaching, surgido en el siglo XX, busca mejorar el desempeño personal y profesional. Tiene raíces filosóficas en la mayéutica socrática y en la ética aristotélica. Tres corrientes destacan: el coaching humanista (Gallwey y Whitmore), el coaching práctico estadounidense (Leonard) y el coaching ontológico sudamericano (Echeverría y Olalla). Finalmente, el coaching sistémico (Calderón) se basa en ver al ser humano como parte de sistemas complejos interrelacionados, promoviendo el desarrollo integral a partir del autoconocimiento y la interacción social.

La filosofía antropológica de Leonardo Polo, aplicada a través de autores como José Antonio Pérez López y sus discípulos Alcázar y Ferreiro, se propone como complemento para el desarrollo personal.

## **3. Objetivos y alcance**

El objetivo general es diseñar un procedimiento que permita a los estudiantes adquirir competencias blandas con apoyo del coaching sistémico y la filosofía antropológica. Se busca medir el impacto en su rendimiento académico y relaciones interpersonales. Los objetivos específicos incluyen establecer un estado inicial, intermedio y final para cada estudiante, y comparar su evolución. El alcance abarca sólo a estudiantes universitarios de pregrado en modalidad presencial.

## **4. Metodología y diseño de herramientas a utilizar**

Se plantea una metodología principalmente cuantitativa, con algunos elementos cualitativos traducidos a datos numéricos. Se realizarán cinco sesiones de coaching de 30 minutos por alumno. Se aplicarán encuestas 360° en tres fases (inicial, intermedia y final) y se considerarán las notas de tres Prácticas Calificadas (PC1, PC2 y PC3) como indicador complementario del rendimiento. También se entregará una separata (Anexo 1) con contenidos sobre habilidades blandas que se quiere desarrollar y que será de lectura obligatoria para los alumnos.

## **5. Cronograma**

El cronograma del proyecto se extiende por dos ciclos académicos (marzo y agosto de 2025). Se detallan las actividades semana por semana: diseño de herramientas, aplicación de encuestas, sesiones de coaching, evaluaciones académicas, procesamiento de datos, elaboración del informe final y trámites de publicación.

## 6. Tratamiento de la información

El análisis es de tipo exploratorio, usando instrumentos validados y confiables. Se registrarán en hojas de control las notas y resultados de las encuestas por estudiante. Se buscará establecer correlaciones que evidencien que el coaching sistémico y el desarrollo de habilidades blandas mejoran tanto el desempeño académico como el desarrollo personal.

## 7. Impacto esperado

Se espera que los resultados muestren cambios positivos en los estudiantes, que mejoren su motivación, liderazgo, convivencia y proyección profesional. Se propone escalar el modelo dentro de la universidad y eventualmente al sistema educativo nacional. Se apuesta por la transformación educativa mediante el desarrollo integral del estudiante.

## 8. Referencias

Se citan autores clave como Calderón, Polo, Gallwey, Whitmore, Echeverría, Ferreiro y Alcázar, además de estudios recientes sobre coaching educativo y habilidades blandas.

Alcazar, M., & Ferreiro, P. (2017). *Governance of people in the company 3* (University of Piura, Ed.; 6th ed., Vol. 3).

Alonso, E. (2011). *¿Cuál es el Origen del Coaching? | Equilibrio y Desarrollo*. Equilibrio y Desarrollo. <https://equilibrioydesarrollo.com/breve-historia-del-coaching/>

Baldevenites, E. V. L., Lucero, S. I., & González, A. M. G. (2022). Development of soft skills in education with educational coaching | COMPETENCIAS BLANDAS EN LA EDUCACIÓN: SU DESARROLLO CON EL COACHING EDUCATIVO. *Human Review. International Humanities Review / Revista Internacional de Humanidades*, 11. <https://doi.org/10.37467/revhuman.v11.3910>


Biswas-Diener, R. (2020). The practice of positive psychology coaching. *Journal of Positive Psychology*, 701–704. <https://doi.org/10.1080/17439760.2020.1789705>

Calderón, A. (2014). *Entrenamiento Internacional en Coaching COACHING BÁSICO*. <https://www.moregsad.com>

De León Augusto. (2023, March 23). (15) *Las habilidades blandas más demandadas | LinkedIn*. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/las-habilidades-blandas-m%C3%A1s-demandadas-jose-augusto-de-leon-perdomo/?originalSubdomain=es>

ESAN Blog. (2019, January 8). *Habilidades blandas más valoradas en las empresas*. Universidad ESAN.

Hayes, E., & Kalmakis, K. A. (2007). From the sidelines: Coaching as a nurse practitioner strategy for improving health outcomes. *Journal of the American Academy of Nurse Practitioners*, 19(11), 555–562. <https://doi.org/10.1111/j.1745-7599.2007.00264.x>

- Isaacs, D. (1981a). *La educación de las virtudes humanas Tomo 2* (Ediciones Universidad de Navarra (EUNSA), Ed.; 3rd ed., Vol. 2). EUNSA.
- Isaacs, D. (1981b). *La educación de las virtudes humanas Tomo I* (EDICIONES UNIVERSIDAD DE NAVARRA (EUNSA), Ed.; 5th ed., Vol. 1). EUNSA.
- Mundana Blog. (2024, March 23). *8 Habilidades blandas más buscadas en el mercado laboral*  Instituto Europeo de Inteligencias Eficientes.  
<https://www.mundana.us/blog/habilidades-blandas>
- Padilla, C. (2021). *¿Cuáles son las habilidades blandas más demandadas por una empresa este 2021? | Universidad Tecnológica del Peru | UTP*. UTP.  
<https://www.utp.edu.pe/noticias/cuales-son-las-habilidades-blandas-mas-demandadas-una-empresa-este-2021>
- Paniza Prados, J. L., Puertas Cañaveral, I., & Molina Morales, J. M. (2019). University coaching: Proposal of a measuring indicator system | Coaching universitario: Propuesta de un sistema de indicadores para su medición. *International Journal of Sociology of Education*, 8(1), 75–102. <https://doi.org/10.17583/rise.2019.3877>
- Sala de comunicación. (2024). *Las 5 habilidades blandas más demandadas por las empresas - Telefónica*. Telefonica. <https://www.telefonica.com/es/sala-comunicacion/blog/las-5-habilidades-blandas-mas-demandadas-por-las-empresas/>
- Sato, A., Harada, N., Suzukamo, Y., Tonomura, I., & Izumi, S.-I. (2023). How coaching training transforms nurses' behaviour: The effectiveness of coaching training according to objective measures. *Nursing Open*, 10(7), 4490–4503. <https://doi.org/10.1002/nop2.1691>
- Solano Ruiz, M. C., & Siles González, J. (2013). The tutor in the process practices in nursing degree | La figura del tutor en el proceso de prácticas en el grado de enfermería. *Index de Enfermería*, 22(4), 248–252. <https://doi.org/10.4321/S1132-12962013000300014>
- Universidad Católica de Chile Blog. (2024). *Los tipos de habilidades blandas más demandadas por las organizaciones*. Capacitación y Desarrollo UC.  
<https://capacitacion.uc.cl/articulos/215-los-tipos-de-habilidades-blandas-mas-demandadas-por-las-organizaciones>

## ANEXO 1

### Separata: Cómo Desarrollar habilidades blandas

#### A. HABILIDADES BLANDAS

Las habilidades blandas son cruciales en el entorno laboral actual, ya que complementan las habilidades técnicas y contribuyen al éxito profesional y personal. A continuación, se detallan las nueve habilidades blandas más valoradas por las empresas:

- **Trabajo en equipo:** Colaborar con otros para alcanzar objetivos comunes. Implica ser cooperativo, flexible, respetuoso y capaz de resolver conflictos.
- **Pensamiento crítico y solución de problemas:** Analizar situaciones complejas de manera objetiva para tomar decisiones informadas y encontrar soluciones efectivas a los desafíos.
- **Adaptabilidad y flexibilidad:** Ajustarse a los cambios, enfrentar nuevos desafíos con una actitud positiva y estar abierto al aprendizaje continuo para adaptarse a nuevas tecnologías y procesos.
- **Comunicación efectiva:** Transmitir mensajes de manera clara, precisa y asertiva. Incluye la escucha activa, la empatía y la capacidad de expresar ideas sin caer en la agresividad o la pasividad.
- **Liderazgo:** Guiar, motivar e influir en un equipo para lograr objetivos comunes. Un líder eficaz es un buen comunicador, toma decisiones difíciles y delega tareas eficientemente.
- **Compromiso:** Cumplir con las responsabilidades y obligaciones con dedicación y perseverancia. Se basa en la ética personal y la capacidad de mantenerse fiel a los compromisos.
- **Gestión del tiempo, organización, planificación:** Asignar el tiempo de manera efectiva, mantener las tareas ordenadas y establecer metas a corto, mediano y largo plazo para maximizar la productividad y reducir el estrés.
- **Creatividad e iniciativa innovadora, Investigación:** Generar ideas originales, tomar la iniciativa para implementarlas y buscar soluciones creativas. La investigación es clave para explorar nuevas ideas y mantenerse competitivo.
- **Inteligencia emocional, empatía:** Comprender y gestionar las propias emociones y las de los demás. Permite manejar el estrés, mejorar las relaciones interpersonales y crear un ambiente de trabajo positivo.

Estas habilidades blandas se pueden adquirir y fortalecer a través de las virtudes humanas. Una virtud es un hábito bueno que se desarrolla mediante la repetición de actos voluntarios. A diferencia de los vicios (hábitos malos), las virtudes se construyen con constancia y esfuerzo. Adquirirlas nos acerca a una vida plena y feliz, mejorando no solo nuestra vida personal, sino también nuestra utilidad y agrado para los demás.

El camino para desarrollar las virtudes implica identificar nuestras fallas y concentrarnos en superarlas. Aunque el proceso requiere fortaleza y constancia, las recompensas incluyen la tranquilidad, la satisfacción personal y una vida más plena. El desarrollo de las virtudes es un proceso de superación personal que nos permite cambiar hábitos malos por hábitos buenos.

La única forma de superación humana es el cambio de hábitos malos por hábitos buenos -Virtudes-.

A continuación, explicaremos algunas de las virtudes en forma práctica y aplicable a todos nuestros actos de la vida diaria, sea éste el trabajo, la vida de familia, en la comunidad, etc.

## B. ALGUNAS VIRTUDES HUMANAS (Isaacs, 1981b, 1981a)

### Algunas virtudes humanas y su relación con las habilidades blandas

Las virtudes humanas son la base para desarrollar las habilidades blandas. No son innatas, sino que se adquieren y fortalecen mediante la práctica constante de actos buenos. A continuación, se describen algunas de las virtudes más importantes y cómo contribuyen al crecimiento personal y profesional.

---

#### Descripción de virtudes clave

- **Fortaleza:** Permite a una persona ser serena, confiada y valiente. Quienes tienen esta virtud saben superar dificultades con alegría y perseverancia, cumpliendo sus deberes y emprendiendo tareas en favor de otros.
- **Prudencia:** Es la capacidad de examinar cuidadosamente las situaciones antes de tomar una decisión. Implica considerar las circunstancias y las consecuencias futuras, basándose en criterios rectos y dignos.
- **Justicia:** Consiste en dar a cada persona lo que le corresponde, respetando sus derechos y deberes. El hombre justo se esfuerza por que los demás también actúen de esta manera.
- **Sobriedad:** Permite distinguir lo razonable de lo inmoderado. Una persona sobria utiliza sus recursos (tiempo, dinero, esfuerzos) de forma racional y evita los caprichos, conociendo el valor real de las cosas.
- **Sinceridad:** Es decir la verdad con claridad, sin herir a los demás ni exagerar. Sin embargo, la prudencia dicta cuándo hablar y cuándo callar para evitar daños innecesarios.
- **Humildad:** Consiste en reconocer nuestras propias cualidades y defectos, obrando de la mejor manera posible sin buscar el aplauso. También implica reconocer los talentos de los demás, alabarlos y estar siempre dispuesto a servir con alegría.
- **Discreción:** Es la virtud de no querer enterarse de todo y saber callar a tiempo. Implica respetar la vida privada de los demás, evitar hablar de su reputación y medir las palabras al elogiar o llamar la atención.
- **Cortesía:** Ser amable y atento con todas las personas. Se manifiesta a través de un vocabulario suave y pequeños detalles que expresan afecto, tanto en el ámbito familiar como en el social.
- **Puntualidad:** Es estar presente a la hora acordada, lo que demuestra justicia y respeto por el tiempo de los demás. La puntualidad no es precipitación, sino una buena gestión del tiempo que evita retrasos y deficiencias en el trabajo.
- **Economía:** Se trata de aprovechar al máximo los recursos, evitando el desperdicio. Permite gastar con orden y medida, priorizando lo indispensable y valorando el fruto del trabajo, lo que ayuda a evitar necesidades inútiles.

- **Buen humor:** Es el resultado de un esfuerzo continuo de la voluntad. Se manifiesta al conservar el equilibrio emocional, disimular las inquietudes para no entristecer a los demás y ver el lado positivo de las cosas. Nace de una conciencia pura y un corazón generoso.
  - **Paciencia:** Consiste en soportar el error, las molestias y las contradicciones manteniendo el control de uno mismo. Es aprender a pensar en los demás antes que, en uno, y a esperar a estar serenos antes de tomar decisiones o responder.
  - **Perseverancia:** Es la constancia para llevar los proyectos a término, superando los obstáculos con tenacidad. Implica ver hacia adelante, confiar en que el esfuerzo mejora y no desanimarse ante las caídas.
  - **Generosidad:** Actuar desinteresadamente y con alegría en favor de otros, pensando en su necesidad. También significa ser menos severo consigo mismo cuando se cometen errores.
  - **Orden:** Consiste en seguir normas para lograr objetivos. Esto va más allá de mantener las cosas en su lugar; incluye planificar las actividades, darles la importancia que merecen y ajustar la vida diaria para cumplir con ellas, como comer a la hora adecuada o seguir instrucciones médicas.
  - **Responsabilidad:** Asumir las consecuencias de nuestras decisiones, incluso si los actos no fueron intencionados. El objetivo es asegurarse de que los demás no sean perjudicados.
  - **Respeto:** Dar a cada persona el lugar que merece como ser humano, sin importar su posición social. Implica aceptar que otros piensen diferente y ejercer la autoridad con dignidad, sin menospreciar a nadie.
  - **Laboriosidad:** Cumplir diligentemente con las actividades necesarias para alcanzar la propia madurez mental y ayudar a otros a hacer lo mismo en el trabajo y en sus demás deberes.
  - **Lealtad:** Aceptar y proteger los valores de los vínculos que se tienen con personas (amigos, familia, jefes) o instituciones. Depende de un proceso de deliberación mental para reconocer el valor de esos vínculos, y se apoya en el desarrollo de otras virtudes.
- 

### Cómo desarrollar las habilidades blandas

Las habilidades blandas se adquieren a través de la práctica de estas virtudes. Al concentrarse en una virtud, como la fortaleza para ser perseverante, se fortalecen otras virtudes que se relacionan con ella. Este proceso continuo permite que los individuos adquieran las virtudes necesarias no solo para el éxito profesional, sino también para mejorar sus relaciones familiares y sociales. El desarrollo de estas virtudes crea un efecto multiplicador, contribuyendo a una sociedad mejor en general.

Se mencionan sólo las principales virtudes humanas, existen muchas más virtudes.

### C. ¿CÓMO DESARROLLAR LAS HABILIDADES BLANDAS?

Las habilidades blandas se adquirirán practicando las virtudes que se recomiendan en la Tabla 1.

Hay virtudes que se repiten de una habilidad blanda a otra, con lo que el proceso que en un principio parece difícil, se convierte en un tapiz donde cada virtud llama a la otra y así se logrará que, en poco tiempo, los estudiantes que desean poseer dichas habilidades habrán adquirido las virtudes necesarias que no solo les servirán para desempeñarse en el trabajo profesional, sino también en el familiar y social. Conforme pase el tiempo y se aplique el procedimiento en la metodología del centro de estudios, el efecto será multiplicador y contaremos con una sociedad mejor.

**TABLA 1. Virtudes para lograr las habilidades blandas**

<b>It.</b>	<b>Habilidades blandas</b>	<b>Virtudes que la apoyan</b>
1.1	Trabajo en equipo	Fortaleza, Prudencia, Justicia, Sobriedad, Sinceridad, Humildad, Discreción, Cortesía, Puntualidad, Buen Humor, Paciencia, Perseverancia, Generosidad, Orden, Responsabilidad, Respeto, Laboriosidad, Lealtad
1.2	Pensamiento crítico y solución de problemas	Fortaleza, Prudencia, Justicia, Sobriedad, Paciencia, Perseverancia, Orden, Responsabilidad, Laboriosidad
1.3	Adaptabilidad y flexibilidad	Fortaleza, Prudencia, Justicia, Sobriedad, Humildad, Puntualidad, Buen Humor, Paciencia, Perseverancia, Orden, Responsabilidad, Respeto, Laboriosidad, Lealtad
1.4	Comunicación efectiva	Fortaleza, Prudencia, Justicia, Sobriedad, Sinceridad, Humildad, Discreción, Cortesía, Puntualidad, Buen Humor, Paciencia, Perseverancia, Orden, Responsabilidad, Respeto, Lealtad
1.5	Liderazgo	Fortaleza, Prudencia, Justicia, Sobriedad, Sinceridad, Humildad, Discreción, Cortesía, Puntualidad, Buen Humor, Paciencia, Perseverancia, Generosidad, Orden, Responsabilidad, Respeto, Laboriosidad, Lealtad
1.6	Compromiso	Fortaleza, Prudencia, Justicia, Sobriedad, Sinceridad, Humildad, Puntualidad, Perseverancia, Generosidad, Orden, Responsabilidad, Respeto, Lealtad
1.7	Gestión del tiempo, organización, planificación	Fortaleza, Prudencia, Justicia, Sobriedad, Sinceridad, Humildad, Discreción, Cortesía, Puntualidad, Buen Humor, Paciencia, Perseverancia, Generosidad, Orden, Responsabilidad, Respeto, Laboriosidad, Lealtad
1.8	Creatividad e iniciativa innovadora, Investigación	Fortaleza, Prudencia, Justicia, Sobriedad, Puntualidad, Paciencia, Perseverancia, Generosidad, Orden, Responsabilidad, Respeto, Laboriosidad, Lealtad
1.9	Inteligencia emocional, empatía	Fortaleza, Prudencia, Justicia, Sobriedad, Sinceridad, Humildad, Discreción, Cortesía, Buen Humor, Paciencia, Generosidad, Orden, Responsabilidad, Respeto, Lealtad

# Digital Twins of the Heart: An Ecosystem

## Gemelos digitales del corazón: un ecosistema

MSc. Ing. Saúl Rodríguez Astucuri  
ExpoNet Sistemas - saulr@exponet.es  
Citar: J. PAIME, 2025, 4, 27-51  
Madrid, 31 de diciembre 2025

### Resumen

El artículo describe los pasos teóricos para formular un ecosistema de gemelos digitales del corazón para pacientes con variaciones del ritmo cardiaco de forma irregular y rápida. Por este motivo, se enumera las simulaciones electrostáticas de la membrana que separa las células en el tejido cardiaco, se revisa las ventajas de las múltiples plataformas de código abierto disponibles a la fecha, y así como, el gobierno de los datos necesario para la analítica avanzada y entrenamiento del modelo de IA, como también de la necesidad de utilizar metodologías ágiles para el desarrollo del gemelo. En ese recorrido, se describe los diferentes esfuerzos para validar la evidencia digital de los diversos modelos electrostáticos y de IA, con los datos clínicos del paciente en tiempo real. Se muestra el potencial estratégico de los gemelos digitales del corazón, los principales en funcionamiento en España.

### Abstract

This article describes the theoretical steps for formulating a digital twin ecosystem of the heart for patients with irregular and rapid heart rhythm variations. To this end, it lists electrostatic simulations of the membrane separating cells in cardiac tissue, reviews the advantages of the various open-source platforms currently available, and addresses the data governance necessary for advanced analytics and AI model training, as well as the need to use agile methodologies for twin development. Along this path, it describes the different efforts to validate the digital evidence of the various electrostatic and AI models with real-time patient clinical data. It demonstrates the strategic potential of digital twins of the heart, highlighting the main digital twins of the heart currently in operation in Spain.

## 1. Introducción

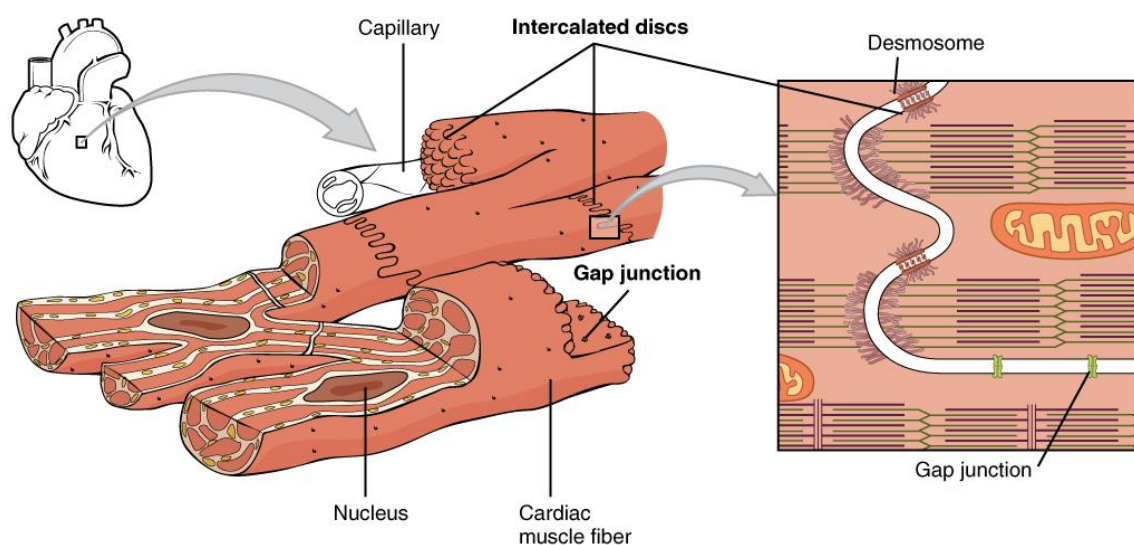
Los gemelos digitales son elementos virtuales de un objeto, sistema o proceso físico que permiten **simular**, **monitorear** y **optimizar** su comportamiento en tiempo real. Se basa en la integración de modelos físicos, datos de sensores conectados en tiempo real y algoritmos de IA para mejorar la toma de decisiones y la eficiencia operativa, de tal forma que permite prever en tiempo real las funciones de su versión física real del objeto, sistema o proceso.

Las características claves de un gemelo digital de un corazón humano son la permanente **conexión y medición** de datos clínicos, utilizando sensores y **modelos computacionales de simulación** para evaluar escenarios y optimizar sus funciones y a su vez para recopilar datos y reflejar en tiempo real los cambios y condiciones operativas del corazón.

## 2. Marco teórico: Electrofisiología del corazón

Hoy en día, los modelos computacionales permiten crear representaciones personalizadas de la electrofisiología cardíaca de un paciente y virtualizarlos en gemelos digitales del corazón. Gracias al modelo personalizado, se puede obtener información sobre la dinámica de propagación eléctrica y utilizarla para sugerir tratamientos personalizados.

A continuación, se muestra un tejido cardíaco en la figura 1, que está compuesto por células del miocardio, se identifica el núcleo de una célula y las **membranas** que separan las células por esas líneas curvas blancas en la ampliación gráfica de la izquierda.

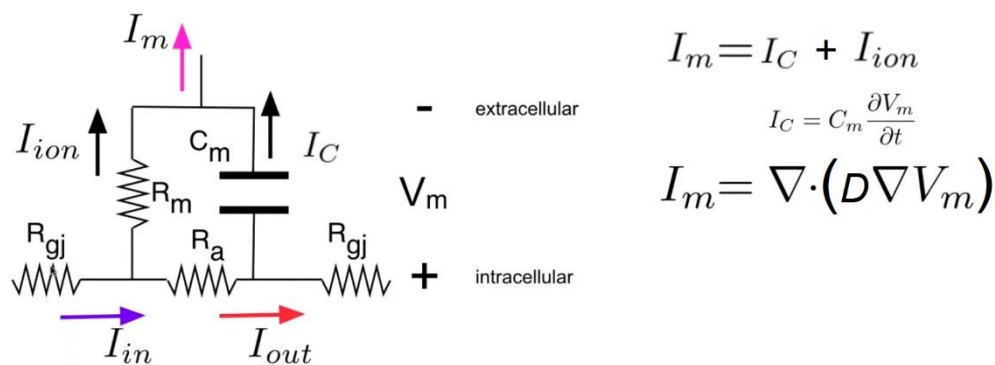


**Figura 1.** Al observar un fragmento de tejido cardíaco, se observa que las células cardíacas tienen muchas conexiones entre sí. Las bifurcaciones tienen pequeños puntos que se proyectan y no hay realmente ninguna conexión lateral. Ahí

están todas las conexiones. Estas líneas onduladas (Intercalated discs), son por donde las células se comunican, es decir, las células se mueven, ya que, si fueran rígidas, las estructuras se desgarrarían. Si se observa con más detalle estas líneas onduladas, **son parte de la membrana celular** que rodea la fibra del músculo cardiomiocito de las células del músculo cardíaco y que contienen uniones en hendidura (Gap junction) y desmosomas (Desmosome) que facilitan el flujo electrostático (Fuente: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cardiac\\_muscle#/media/File:1020\\_Cardiac\\_Muscle.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Cardiac_muscle#/media/File:1020_Cardiac_Muscle.jpg))

Ahora bien, tenemos dos dominios separados por una membrana: uno **intracelular** y otro **extracelular**. Tenemos un espacio dentro de la célula y otro fuera de ella. Luego, asumimos que estos dominios, **están separados por una membrana** y que existen en todas partes, y son continuos e inter penetrantes. Esto significa que, dentro de cierto volumen, y en cualquier punto, existe un espacio intracelular.

En la figura 2, mostramos un equivalente eléctrico de la electrostática de la membrana celular {2}.



**Figura 2.** La representación electrostática más simple de una membrana celular es simplemente una resistencia en paralelo con el condensador. Es simplemente una resistencia pasiva, a la que llamamos  $R_m$ , y un condensador  $C_m$ . Y representamos unión en hendidura (Gap junction) con  $R_{gj}$ . Asumimos que, para amplitudes bajas, la membrana no está activa. La flecha violeta representa la corriente que fluye desde la celda aguas arriba  $I_{in}$ . Y luego tenemos la flecha roja que indica el punto de corriente  $I_{out}$  hacia la celda aguas abajo y hay un voltaje  $V_m$  a través del condensador, y por supuesto, hay una corriente  $I_m$  que fluye fuera de la membrana (gradiente). La corriente que fluye más afuera de la membrana, en la representación del gráfico se muestra como  $I_{in}$  menos  $I_{out}$  que es igual a  $I_{ion}$  más  $I_C$ , y así mismo,  $I_m$  es igual a la **corriente que fluye a través del condensador** más el **flujo de corriente de cualquier canal iónico que  $R_m$  represente**, y podemos escribirlo en forma diferencial con el operador laplaciano  $\nabla^2$ . Simplemente indica que la **divergencia del gradiente del campo escalar de potencial** es la **densidad de corriente en ese punto**. Entonces, la corriente que atraviesa la membrana se puede considerar como un caso simple: una onda plana que viaja desde la parte inferior de la lámina hasta la parte superior. (Fuente: Descripción general de las simulaciones de electrofisiología cardíaca. <https://opencarp.org/documentation/video-tutorials-y-propia>.)

### 3. Modelo celular

Como parte del flujo de corriente a través de la membrana, tenemos una de las corrientes iónicas dadas en el término  $I_{ion}$ , que varía según el tipo del ion que fluye por tanto su resistencia pasiva  $R_m$ . Existen modelos in silico para calcular computacionalmente el potencial de acción auricular humano y una muy reconocida es el Modelo Celular para el potencial de acción auricular humano, desarrollado por Courtemanche–Ramirez–Nattel (CRN, 1998) {3}, que:

- Incluye varios **iones** esenciales de sodio, potasio, calcio y cloro circulan en el corazón, permitiendo que el músculo cardíaco genere impulsos eléctricos y se contraiga rítmicamente. Es decir, incluye flujos de corrientes iónicas:  $I_{Na}$ ,  $I_{CaL}$ ,  $I_{to}$ ,  $I_{Kr}$ ,  $I_{Ks}$ ,  $I_{K1}$ ,  $I_{Kur}$ ,  $I_{NaCa}$ ,  $I_{NaK}$ , etc.
- Permite reproducir el **potencial de acción auricular humano** en condiciones normales y patológicas (ej. fibrilación auricular).

Estas membranas que unen células realmente tienen un potencial eléctrico, a manera de un condensador y un flujo de corriente por las junturas (Gap junction) que unen las células sobre las membranas. Justamente, a través de los tejidos del corazón circulan iones que permiten que el músculo cardíaco genere impulsos eléctricos y se contraiga rítmicamente, es decir flujos de corriente iónica.

#### 4. Modelo BIDOMINIO: Electrostática del corazón

El investigador, Tung, Leslie del MIT en 1978 {2}. Nos dejó un estudio aplicado a la electrofisiología cardíaca desde el punto de vista electrostático de circuitos eléctricos, a través el modelo bidominio, simulando el funcionamiento del corazón con el potencial de corriente continua del miocardio isquémico, es decir, la actividad eléctrica de un tejido. El estudio se titula "Un modelo bidominio para describir los potenciales de corriente continua en miocárdicos isquémicos".

Este modelo, tiene en particular dos términos, el primero para medir las densidades corrientes del modo común y el segundo el potencial de modo diferencial que están alrededor de la membrana que separa las células.

Las soluciones generales para el potencial extracelular o intracelular en una estructura bidominio se componen de dos términos: uno compartido por las estructuras mono dominio (aplica la ecuación de Laplace, llamada parabólica porque tiene una derivada temporal de primer orden) y otro exclusivo de las estructuras bidominio (aplica la ecuación de Helmholtz, llamada elíptica y básicamente no hay tiempo en esta ecuación. Así que en realidad lo hace un poco más difícil de resolver).

Además, las simulaciones eikonaes son una forma computacionalmente eficiente de simular la propagación de la excitación del miocardio. Por otro lado, para conocer el potencial extracelular o intracelular del corazón, es suficiente un mapa de potencial de superficie de los tejidos del corazón y se puede calcular utilizando un modelo bidominio. Sin embargo, resolver el modelo bidominio es computacionalmente costoso debido a la alta precisión en la simulación de los mapas de potencial de superficie, pero se puede simplificar con los modelos mono dominio para calcular el mapa de potencial de la superficie del corazón de una manera rápida y menos precisa.

## 5. Modelo MONO DOMINIO: Membrana del corazón

Se asocia que el modelo de electrostático representa el potencial y la corriente total de la membrana  $I_m$  igual a la corriente que fluye a través del condensador más el flujo de corriente  $I_{ion}$  de cualquier canal iónico que  $R_m$  represente (Gap junction). Además, el potencial de acción resultante en el término  $I_{ion}$ , se incorporará dentro del **modelo mono dominio**, describiendo cómo se propaga la excitación en el tejido auricular.

En definitiva, esa corriente de la membrana no es otra cosa que la divergencia de producto del tensor de difusión por el gradiente del potencial.

Por tanto, la ecuación diferencial del **modelo mono dominio**, se escribe como una ecuación diferencia parcial (PDE) en la siguiente figura 3.

$$\chi C_m \frac{\partial V_m}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla V_m) - \chi I_{ion}(V_m, \mathbf{s}) + \chi I_{app}(x, t)$$

**Figura 3.** La ecuación diferencial del **modelo mono dominio** tiene las siguientes variables:

- $V_m = \phi_i - \phi_e$ : **potencial transmembrana** (diferencia entre potencial intracelular y extracelular).
- $\mathbf{S}$ : variables del modelo iónico (puertas, concentraciones)
- $\chi$ : relación área de membrana / volumen del tejido p.ej.  $\chi = 1400 \text{ cm}^{-1}$ .
- $C_m$ : capacitancia de membrana p.ej.  $C_m = 1 \mu \text{ F/cm}^2$ .
- $D$ : tensor de difusión anisotrópico, que modela la **anisotropía** del tejido cardíaco (dirección de fibras miocárdicas).
- $I_{ion}(V_m, \mathbf{s})$ : suma de corrientes iónicas que dependen del **potencial de acción auricular humano** y de variables de estado  $\mathbf{S}$  (**modelo celular**, p.ej. CRN auricular humano, puertas de activación, concentración de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , etc.).
- $I_{app}$ : **estímulos aplicados** o corriente externa aplicada (ej. Estímulo eléctrico artificial)

**Condiciones:**

- **Inicial:**  $V_m(x, 0) = V_0(x)$ ,  $\mathbf{s}(x, 0) = \mathbf{s}_0(x)$  (estado en reposo).
- **Frontera** (Neumann natural, tejido aislado):  $(D \nabla V_m) \cdot \mathbf{n} = 0$  en  $\partial\Omega$ .

Fuente: GPT-5 con razonamiento avanzado

La ecuación exacta define que la gradiente del potencial existente en la membrana es igual al flujo de corriente de la membrana, menos la corriente iónica que está pasando por las junturas verdes, más un flujo de corriente de estímulos externos aplicados por los sensores o instrumentos médicos.

Las características principales de aplicación del **modelo mono dominio** son:

- **Reducción de complejidad** respecto a la ecuación exacta del modelo bidominio (que usa dos ecuaciones acopladas elípticas), el modelo mono dominio resuelve solo una ecuación exacta temporal, siendo más eficiente computacionalmente con la variable tiempo en el potencial eléctrico del condensador y en el estímulo eléctrico externo.

- **Anisotropía:** el tensor de difusión  $D$  ajusta la propagación eléctrica según la orientación de fibras auriculares (gradiente), es decir a manera de redes de conducción a nivel de tejido.
- **Acoplamiento multiescalar:** combina las corrientes iónicas del **modelo celular** ( $I_{ion}$  channel) con el **modelo tisular** (propagación  $V_m$  y tensor de difusión anisotrópico  $D$ ).
- **Aplicación clínica:** se usa para estudiar arritmias auriculares, evaluar terapias farmacológicas y planificar ablaciones en fibrilación auricular.

Computacionalmente la ecuación mono dominio se acopla con algoritmos de IA para predecir el funcionamiento futuro del corazón. Por lo cual, compensa usar el **modelo mono dominio** para mostrar un marco de desarrollo de aplicabilidad de dicha ecuación en los modelos de gemelos digitales del corazón de humanos, especialmente en la simulación del potencial de acción auricular.

## 6. Extraer, Transformar y Cargar DATOS

Hasta este **primer** momento, se ha preparado el modelo computacional que simula la electrofisiología del corazón que genera datos clínicos virtuales muy similares a los datos clínicos del paciente.

Sin embargo, es muy conveniente combinar los datos o extraer datos complementarios de los otros dispositivos quirúrgicos que hubiere, transformarlos de manera consistente o simplemente limpiar los datos. En esta transformación se tiene que corregir, si acaso hubiera algún dato erróneo.

La tecnología de gemelos digitales va más allá de las imágenes médicas tradicionales, porque se les permite utilizar **datos digitalizados** casi en tiempo real, al igual que los comercios actuales.

Estos modelos computacionales tridimensionales integran información digital obtenida mediante resonancia magnética, registros médicos electrónicos, de la historia clínica electrónica, antecedentes familiares, secuenciación de ADN, datos demográficos como sexo y edad, estudios bioquímicos, variables fisiológicas y factores ambientales. Esta integración multidimensional permite crear una réplica digital que se actualiza continuamente, facilitando la simulación del comportamiento dinámico del corazón en tiempo real.

Los gemelos digitales del corazón son en potencia un generador de datos digitales para la analítica avanzada y la inteligencia artificial.

Y finalmente cargar esos datos complementarios al algoritmo de IA. A partir de este punto se abre el último ciclo de iteración de entrenamiento del modelo de IA por el Data Analyst.

La tarea de transformación normalmente consiste en el 80% de trabajo global y es realizado por el Data Engineer.

En **segundo** lugar, después de que los con datos clínicos virtuales, el modelo IA ha sido entrenado y ya busca discernir situaciones específicas de la patología en la que haya sido entrenado.

Mantengamos la ventaja de que el gemelo digital esta potencialmente preparado para generar datos en tiempo real hacia adelante o de forma paralela a los datos clínicos que tenga el paciente.

Por lo cual, al generar datos hacia adelante, sin participación, sin tocar el corazón del paciente, se está prediciendo el comportamiento futuro del corazón del paciente. En definitiva, se puede conocer el funcionamiento futuro del corazón.

Es decir, después de replicar en tiempo real el corazón del paciente en el gemelo digital, se puede realizar pruebas diagnósticas de fármacos: primero en el gemelo digital y cuando decida el medico la mejor terapia, recién se proporcionaría la terapia seleccionada al paciente.

En definitiva, esta tecnología no sustituye al cuidado humano ni a la experiencia médica, pero le proporciona herramientas mucho más precisas al equipo médico para tomar decisiones personalizadas.

## 7. Plataformas abiertas de Simulación Cardíaca

Existen simuladores software de la electrofisiología cardíaca abierta para experimentos con fines académicos.

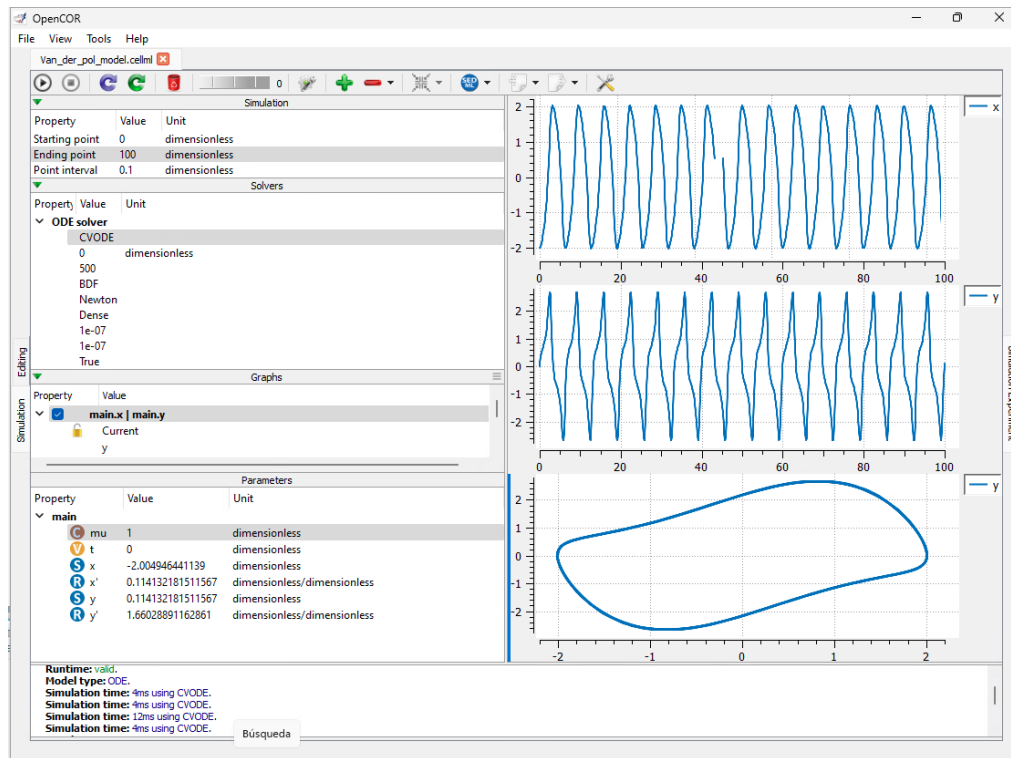
Las **plataformas abiertas** más utilizadas para simular la electrofisiología y el comportamiento del corazón humano son: OpenCOR, OpenCARP, Chaste, existen otras herramientas relevantes como Myokit, OpenCMISS, FEniCS / FEniCSx y plataformas auxiliares.

El uso de las plataformas abiertas conlleva a tener detrás un hospital que aporte casos reales de pacientes cardiacos, siempre respetando la protección de datos de los pacientes. Además, toda investigación requiere avanzar publicando manuscritos inéditos.

A continuación, y en primer lugar, mostramos la plataforma **OpenCOR** en la figura 4, que permite simular modelos celulares con el lenguaje declarativo *cellML*, para validar y probar con un análisis rápido de modelos iónicos; con una potente interfaz gráfica. *CellML* ha sido desarrollado por el Instituto de Bioingeniería de Auckland en la Universidad de Auckland - Nueva Zelanda y grupos de investigación afiliados. {9}

$$\frac{dx}{dt} = y$$

$$\frac{dy}{dt} = \mu \cdot (1 - x^2) \cdot y - x$$



**Figura 4.** Plataforma OpenCOR Version 0.8.3 con el modelo simple y que también se puede utilizar el modelo celular CRN (Fuente: propia)

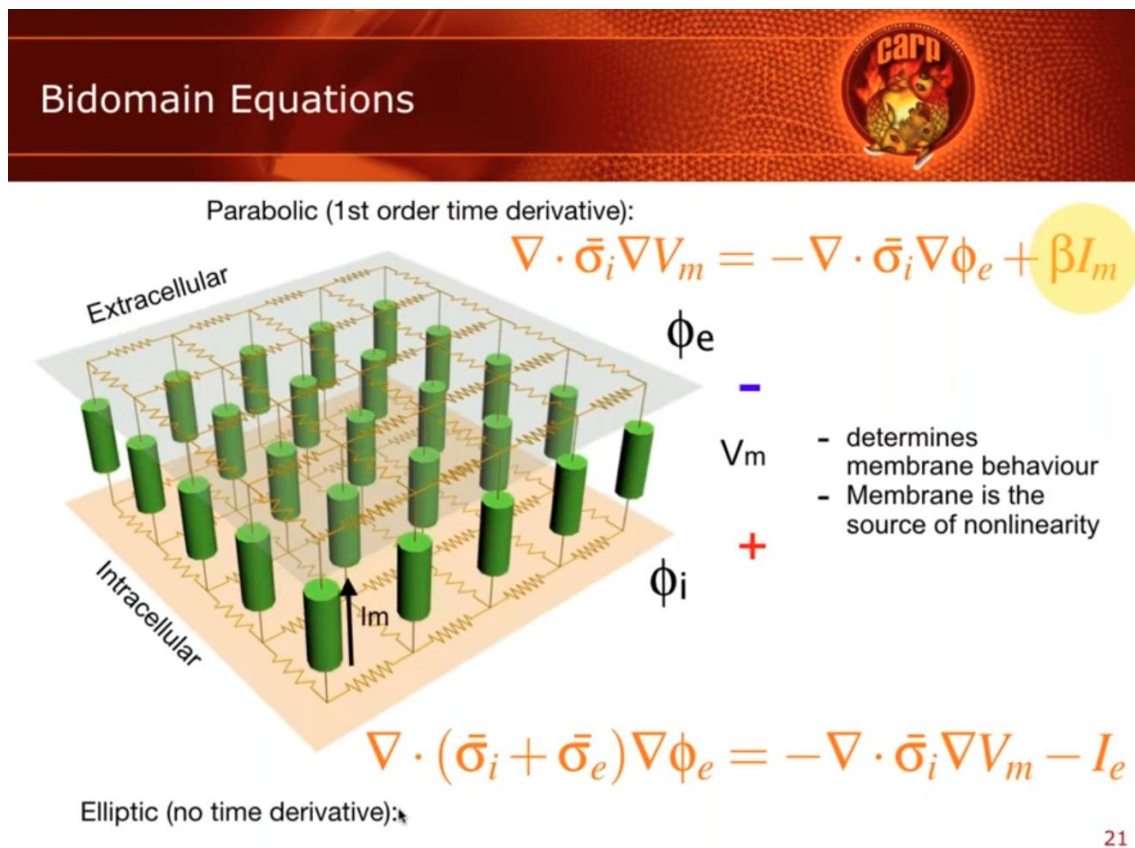
El modelo celular auricular humano de Courtemanche–Ramirez–Nattel para el término  $I_{ion}$  está disponible el código abierto para la plataforma OpenCOR. {10}

La segunda plataforma abierta **OPENCARP**, es un simulador de electrofisiología cardíaca multiescalar específico de órgano completo (desde célula a órgano); es una plataforma potente que ofrece utilidades en CARPutils (Python) para automatizar el pre/post procesado y compartir experimentos reproducibles. Disponible gratuitamente con fines académicos. Para la visualización, OpenCARP incluye utilidades como Meshalyzer, y JupyterLab workflows. La gobernanza de la plataforma se lleva con las siguientes instituciones alemanas: NumeriCor GmbH, Instituto de Tecnología de Karlsruhe - Alemania, IHU Liryc Burdeos, Universidad Médica de Graz. {11}

La utilización de la plataforma abierta **OPENCARP**, permite escalar el modelo bidominio para completar la simulación a nivel de todos los tejidos del corazón.

En cierto modo, el dominio intracelular u extracelular se entrelazan, se interponen, de modo que existen en todas partes. Además, la corriente sale de un dominio y entra en otro, por lo que no puede destruirse. Si sale del dominio extracelular,

debe fluir hacia las células adicionales, a este proceso le llamamos **homogeneización de las células**. En lugar de trabajar con una célula discreta, muestreamos un volumen y obtenemos las propiedades sobre dicho volumen, y luego decimos que es constante en todo el espacio. Así que homogeneizamos sobre el dominio de la infraestructura seleccionada, es decir, se necesita solo un dominio de infraestructura para encontrar la solución. En la figura 5, solo hay que elegir volúmenes lo suficientemente grandes como para que las propiedades sean constantes, lo que significa que el volumen que se homogeneiza debe ser mayor que una célula para utilizar los modelos de simulación.



**Figura 5.** Aquí hay una representación gráfica del dominio  $V_m$ . Supongamos que tenemos un espacio extracelular, que es el medio lineal, que es básicamente un medio resistivo, de modo que, si se le aplica voltaje o carga, se cargará, básicamente, como planos de resistores. Lo mismo aplica para el espacio intracelular, que tienen un medio lineal. Sin embargo, al conectar ambos, tenemos estos pequeños **fragmentos de membrana** que dibujamos en verde, y estas membranas presentan linealidades no lineales, lo que la hace interesante. La ecuación bidominio se puede reescribir con mayor frecuencia en dos ecuaciones. La ecuación superior se llama parabólica porque tiene una derivada temporal de primer orden. No es obvio cuando se escribe así, pero en el término  $I_m$  tenemos una primera derivada para la corriente capacitiva  $d\beta$  por  $dt$ . Esto hace que esta ecuación sea parabólica. Y para la segunda ecuación inferior, esta es una elíptica y básicamente no existe la variable tiempo durante esta ecuación. Así que en realidad lo hace un poco más difícil de resolver. (Fuente: Descripción general de las simulaciones de electrofisiología cardíaca. <https://opencarp.org/documentation/video-tutorials>.)

La plataforma **OPENCARP** se caracteriza por que tiene un simulador de electrofisiología de órgano completo, permitiendo que se simule y que se reutilice el gemelo digital en otros laboratorios, es decir, disponer que se reproduzca un gemelo digital en otro laboratorio. Esta característica de

reproducibilidad permite verificar que se confía en ese software que se está desarrollando.

La tercera plataforma **Chaste** (Cancer, Heart and Soft Tissue Environment) es una librería C++ robusta y verificada para simulaciones cardíacas a gran escala y con requerimiento de computación de alto rendimiento en biología y fisiología. La funcionalidad actual incluye electrofisiología a nivel de tejido y células, modelado de tejidos discretos y modelado de tejidos blandos. El paquete está siendo desarrollado por un equipo basado principalmente en el Grupo de Biología Computacional del Departamento de Ciencias de la Computación de la Universidad de Oxford, y el desarrollo se basa en la experiencia de la ingeniería de software, la computación de alto rendimiento, el modelado matemático y la computación científica. {12}

La cuarta herramienta **Myokit** es ligera y muy práctica para simulación y análisis de modelos celulares de miocitos cardíacos y su electrofisiología; tiene buena interfaz Python para experimentos y exportaciones. Útil para validar o comprobar modelos iónicos. Fue creado en la Universidad de Maastricht, y se desarrolló aún más en la Universidad de Oxford y la Universidad de Nottingham. {13}

Para utilizar las **plataformas abiertas** que están ligadas a instituciones universitarias de investigación, se requiere que toda investigación se publiquen los resultados del código abierto e inclusive con los datos o parámetros.

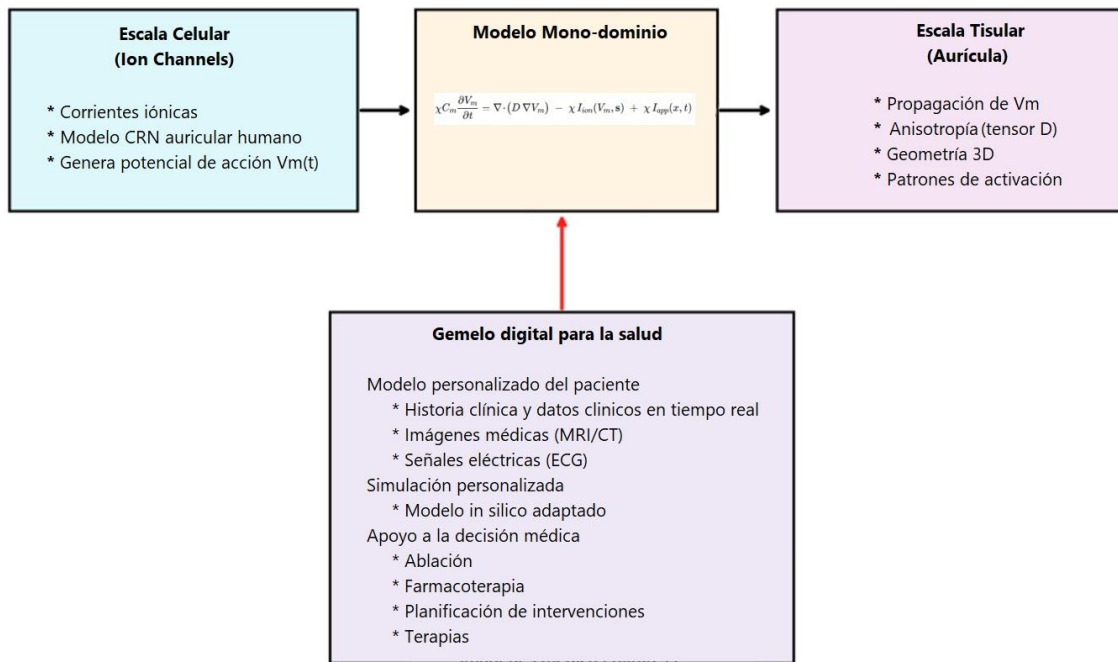
En realidad, son muy necesarios últimamente que se publiquen los datos a fin de verificar la confiabilidad del código abierto. Sin embargo, las entidades que financian esas investigaciones muchas veces no permiten esa licencia de publicar datos. Además, es necesario cumplir estrictas y exhaustivas cláusulas de identificación y responsabilidad académica demostrada, a partir de este hito, el camino es prometedor para centros de investigación.

En general, todas las plataformas pretenden que se utilice para este fin. Por lo cual, estas herramientas están a disposición y se puede utilizar bajo ciertos requisitos como Centro de Investigación, entonces lo importante está en que, si alguien de lo que están en nuestra escucha, desean realizar pruebas o desean participar en estas plataformas, solamente hay que buscarlas, asociarse con un Centro de Investigación, ver qué tipo de patología se quiere resolver y adelante.

## 8. Esquema de procesos y preparación inicial del modelo IA

Finalmente, llegamos al paso de integrar los modelos anteriores para resolver situaciones en tiempo real, un ejemplo puede ser el que se muestra en la figura 6, es decir, una vez se haya validado el modelo predictivo IA juntamente con los

simuladores virtuales anteriores, estará listo para trabajar todo el ciclo de simulación, monitorización, y optimización de terapias.



**Figura 6.** Esquema visual del gemelo digital que simula la electrofisiología cardíaca desde los canales iónicos hasta todo el corazón. Se muestra cómo se conectan los modelos celulares y mono dominio detallados y personalizados, las redes de propagación a nivel de tejido con geometrías precisas anatómicamente (3D). Anisotropía, propiedad de los tejidos cardiacos de comportarse de forma diferente según la dirección del potencial de acción. (Fuente: propia)

Desagregando el proceso de construcción del gemelo digital, primero se simula un corazón humano de forma tan idéntica a los datos clínicos del paciente y que se registran de forma paralela al de la simulación. El sistema experto simula el funcionamiento del corazón de forma muy confiable, y verificable con los datos clínicos del paciente. En este punto, tenemos un potente generador de datos virtual del funcionamiento del corazón, con la particularidad que puede generar datos cada milisegundo durante un periodo de tiempo, y como ya sabemos la analítica avanzada y la inteligencia artificial se ponen muy contentas cuando tienen datos.

Por ejemplo, se puede generar datos simulando con el **modelo celular auricular** humano de Courtemanche–Ramírez–Nattel para el término  $I_{ion}$  durante un periodo de tiempo, almacenando dichos datos en formato CSV.

Con esos datos, se inicia la tarea de analítica avanzada, por ejemplo, en una primera etapa con el 80% de los datos para entrenar el algoritmo IA para que reconozca las características de esos datos, y con el 20% restante verificar que el modelo IA responda con una certeza cercana a 1, de tal forma, que cuando se le presente una nueva situación con datos reales al modelo celular responda lo más cerca posible a los valores clínicos del paciente.

De la misma forma, es posible que el nuevo modelo IA aprenda las características del simulador del **modelo mono dominio**, primero almacenando digitalmente los datos generados, y luego repitiendo tantas veces como sean necesarias el entrenamiento y validación del algoritmo IA. Muy posible, se tenga que enumerar una serie de parámetros operativos y personalizados del modelo IA para aproximar las predicciones a una certeza cercana a 1 en tiempo real.

Si hubiera necesidad de ajustar otro modelo se repite el ciclo anterior, y se puede iterar de forma sistemática utilizando alguna metodología ágil para mejorar el desempeño del equipo de investigación.

## 9. Funciones del Gemelo Digital

La aplicación de los Gemelos Digitales del Corazón se utilizaría para:

- Simular la **activación auricular** en 3D.
- Reproducir patrones de propagación durante **fibrilación auricular**.
- Evaluar el efecto de fármacos (modificando los canales iónicos  $I_{ion}$ ).
- Personalizar tratamientos según geometría e historial clínico del paciente.
- Entre otras de acuerdo con la patología del paciente.

Por ejemplo, con esa facilidad de interactividad y análisis virtual que tiene el gemelo digital, se puede realizar pruebas sin afectar el corazón. Y así facilitar la detección temprana de posibles fallos o reducir riesgos.

Otro caso es las pruebas de fármacos, es decir, si ya tenemos el gemelo digital en funcionamiento de manera paralela al paciente, lo que se puede hacer es, medicar a gemelo digital y a ver qué pasa y cuando realmente se tenga certeza de que el gemelo digital responde correctamente a ese fármaco, recién se puede aplicar ese fármaco como la mejor terapia para ese paciente en particular.

Y aquí hay una cuestión adicional, las compañías farmacéuticas, necesitan gemelos digitales de diversos órganos para realizar pruebas. Sin embargo, en el caso específico que nos ocupa, el gemelo digital se puede utilizar para preparar fármacos y reducir el tiempo de gestión de las moléculas hasta un año cuando normalmente son más de 10 años de pruebas, con el consiguiente ahorro de costes y tiempo en la producción de fármacos. Y este punto, se puede participar o invitar o solicitar a las farmacéuticas. Mire Usted, tenemos el gemelo digital con tales características, y se puede hacer estas pruebas con lo cual, quizá o no, dependiendo del grado de destreza que tenga el gemelo digital que hayamos preparado, se pueda analizar diversas moléculas para revertir ciertas patologías. Este es el reto.

## 10. Validar las simulaciones

Otro de los temas para tener en cuenta es: ¿por qué debemos confiar en estas simulaciones? La validación comienza en confiar en el software, y una forma es reproducir en diferentes centros de investigación las terapias o ablaciones con ese gemelo digital de la figura 7. Entonces, recién la inteligencia artificial estará integrándose dentro de la tecnología de gemelos digitales, principalmente, validando datos clínicos en tiempo real del paciente con los que esté proporcionando el gemelo digital, también en tiempo real.



**Figura 7.** Gemelo Digital que simula la electrofisiología (Fuente: Propia)

Y ya se ha comentado por doctores que nos han precedido, que esta tecnología no sustituye al cuidado humano ni a la experiencia médica. O sea, siempre va a estar detrás de la decisión médica, el gemelo digital proporcionará herramientas más precisas para que el equipo médico tome decisiones personalizadas, además porque se puede tener almacenado el gemelo digital del corazón de cada paciente que haya pasado por esta terapia.

La inteligencia artificial se integra con la tecnología de los gemelos digitales cuando se valida sus datos clínicos del paciente en tiempo real, así se podría transformar la medicina cardiovascular para los próximos años. Ya no se trata de tratar a un paciente "tipo", sino de diseñar la mejor estrategia para cada corazón

concreto, con sus singularidades, su historia y su particular latir. Además, relaciona diversos campos: modelado computacional, electrofisiología, hemodinámica, modelado biomecánico y análisis avanzado con los datos de los sensores.

En particular, a la fecha tenemos modelos existentes que simulan computacionalmente el corazón en alguna de sus funciones, también denominado a estas simulaciones como ensayos in silico, por el tratamiento de los algoritmos en microprocesadores de silicio.

“Una de las aplicaciones del modelado y la simulación en medicina está cobrando mucha fuerza es el concepto de ensayos in silico, utilizado para la obtención de evidencia digital a través de un modelo de simulación y también del aprendizaje automático para el desarrollo y la evaluación de terapias, como para la medicina de precisión” {1}.

“Así que estamos muy avanzados en términos de metodologías y una de las preguntas clave es ¿por qué debemos confiar en estas simulaciones? La respuesta a esta pregunta es muy compleja, pero realmente comienza con la reproducibilidad y con la confianza en el software que usamos para las simulaciones, y en este contexto es donde el software abierto puede volverse muy importante porque permite la reproducibilidad, no solo intra laboratorio, sino también inter laboratorio, y eso es muy importante” {1}.

Y precisamente existen plataformas abiertas que permiten la reproducibilidad, como OpenCOR, OpenCARP, entre otras como VIDAA que permiten replicar los gemelos digitales.

## **11. Personalización de la Terapia medica**

Entonces, la adopción creciente en hospitales y la madurez de cómputo nos llevan a pensar que tenemos utilizar esta tecnología. Principalmente porque nos van a dar una prevención personalizada de pacientes que así se decida. Ya hemos visto que 7 millones y medio de personas o corazones nos esperan en Perú.

Los Gemelos Digitales del Corazón son modelos computacionales personalizados del corazón que integran anatomía, mecánica, electrografía y datos clínicos del paciente. Su potencial estratégico radica en tres ejes principales:

- Mejorar decisiones clínicas individualizadas (diagnóstico, selección de terapia, planificación de intervenciones).
- Reducir costes y riesgos (menor número de procedimientos fallidos, optimización de dispositivos).

- Acelerar I+D y regulación (simulaciones para diseño de dispositivos, evidencia virtual para ensayos y aprobación regulatoria).

Su adopción creciente en hospitales y la madurez de cómputo versus la analítica avanzada y la inteligencia artificial colocan a los gemelos digitales del corazón como una tecnología transformadora en cardiología, con un futuro que va desde soportes de decisión clínica (5 años) hasta ecosistemas de salud basados en "gemelos" que gobiernen prevención y terapia personalizada (10–20 años).

Los gemelos digitales del corazón permiten simular el comportamiento del corazón de cada paciente para predecir y optimizar tratamientos antes de intervenir. Se integran en los flujos clínicos actuales y reducen costes, tiempo y riesgo.

## 12.Oportunidad estratégica de adopción

Así tenemos, en la tabla 1, se muestra la visión y oportunidad estratégica moderada en el mercado de tecnologías de salud digital durante 2023-2030, en especial la medicina predictiva de los gemelos digitales cardíacos, que tienen una tasa de crecimiento sostenido anual aproximadamente del 38 % anual compuesto.

Indicador global	Situación 2023	Proyección 2030
Tamaño mercado global de gemelos digitales en salud	USD 1.3 Bn	USD 12.7 Bn
Crecimiento anual del sector salud	—	+38% anual (2023–2030)
Penetración en hospitales de la Unión Europea	<5%	esperada >40%
Casos de uso prioritarios	Ablación FA, TRC, cirugía valvular, farmacología digital	Expansión a cardiología integral

**Tabla 1. Gemelos Digitales del Corazón: la nueva frontera de la medicina predictiva.** España dispone de ecosistema pionero y tiene varias instituciones de medicina virtual cardiovascular. Bn: mil millones. CAGR: Tasa de Crecimiento Anual Compuesta (Compound Annual Growth Rate) ver Figura 8. FA: Fibrilación auricular. TRC: terapia de resincronización cardíaca. Fuente: Propia

La oportunidad estratégica que nos presenta el tamaño del mercado global de gemelos digitales en salud para el año 2030, llega a ser 12 billones de dólares americanos, es decir, habrá un crecimiento sostenido anual del 38% respecto al año 2023. Se trata de que, en el año 2030, por lo menos en Europa, que cuando un paciente llegue al hospital se le realice un diagnóstico global del corazón, ya

no se le va a revisar si tiene una fibrilación o una arritmia, o si tiene tal patología en particular, se le verán todas las patologías que tiene de forma integral en ese corazón del paciente.

$$CAGR = \left( \frac{12.7}{1.3} \right)^{\frac{1}{7}} - 1 = (9.77)^{0.1429} - 1 \approx 0.38 = 38\%$$

**Figura 8.** CAGR: Tasa de Crecimiento Anual Compuesta (Compound Annual Growth Rate).

Por otro lado, si un hospital invirtiera entre USD 250.000 y USD 450.000 para implementar un gemelo digital en 3 años. Con las áreas de impacto que se muestran en la tabla 2, se puede tener un beneficio entre el 80% y 130% beneficio neto sobre la inversión inicial en tres años, simplemente por ser más eficiente y personalizado en la terapia del paciente, cuidando la disponibilidad y descanso del equipo médico que está laborando. Es decir, si disminuye el tiempo de procedimiento en una hora, significa que está disminuyendo un 20% los costes, que ya es dinero, o si disminuye las reintervenciones por resincronización cardiaca se puede llegar a ahorrar hasta en 50% de dinero y tiempo, que va ligado directamente a la estancia hospitalaria de los tratamientos del paciente.

Además de los beneficios en la medicina preventiva: como la predicción temprana de arritmias, llevando a cabo los ensayos virtuales con la reducción del 30% en tiempo de los dispositivos de I+D, y el valor añadido para aseguradoras y fabricantes de dispositivos médicos.

Ese rango refleja que se reducen los costes clínicos (menos reintervenciones, menor tiempo de hospitalización, menos consumo de material), se aumenta la eficiencia del personal y los equipos, y, por último, se mejora la tasa de éxito de procedimientos complejos (menos fallos, menos revisiones). El ROI puede ser mayor si el hospital escala la tecnología o la ofrece a terceros (por ejemplo, simulaciones externas o formación).

Área de impacto	Situación inicial	Con gemelo digital	Mejora esperada
Tasa de éxito de ablación FA	65–70%	80–85%	+20%
Reintervenciones TRC/DAI	25–30%	10–15%	–40–50%
Tiempo de procedimiento	4–6 h	3–4 h	–20–30%
Estancia hospitalaria media	3.2 días	2.4 días	–25%
Ahorro medio por paciente	—	1.200–2.500	ROI ≈ 1.8× en 3 años

**Tabla 2. Reducción de procedimientos reactivos y se pasa a la terapia personalizada basada en simulaciones.** FA: Fibrilación auricular. TRC: terapia de resincronización cardíaca. DAI: Desfibrilador Automático Implantable en el paciente. ROI = Beneficio total / Inversión=450.000/250.000=1.8. Fuente: Propia

En un hipotético plan de adopción y escalado de estos gemelos digitales para 3 años, se recomienda de que en el primer año se haga un piloto clínico con una valoración técnica de unos 60 pacientes de diversas patologías, en el segundo año se realice el diagnóstico integral o global a todo paciente llegue, y, además, en el tercer año, se podría escalar invitando a otros hospitales para que adopten esta tecnología.

En la tabla 3, se muestra un plan de adopción y escalado desde el primer año al tercer año. Existen factores clave para el éxito del plan. Por ejemplo: Es fundamental la colaboración público–privada (hospital + empresa + academia), así mismo, en la obtención del consentimiento informado por escrito del paciente como parte del cumplimiento del reglamento de protección de datos de los pacientes, utilización de plataformas iCloud e IA híbrida para simulación rápida, y por último posicionamiento de marca como hospital/inversor líder en innovación cardíaca.

Fases	Periodo	Hito principal	Indicador de éxito
Piloto clínico	0–12 mes	Validación técnica + 60 pacientes (FA/TV/TRC)	>80% precisión en predicción
Escalado hospitalario	12–24 mes	Integración completa en Electrofisiología / TRC	Reducción 15% costes directos
Expansión regional	24–36 mes	Alianza con 3 hospitales + fabricantes	ROI sostenido >2×

**Tabla 3. Camino hacia la adopción clínica y liderazgo en innovación médica.** FA: Fibrilación auricular. TRC: terapia de resincronización cardíaca. TV: Taquicardia Ventricular. ROI = Beneficio total / Inversión. Fuente: Propia

Entonces el potencial estratégico de los gemelos digitales está principalmente en mejorar decisiones clínicas, y con evidencias clínicas sólidas, como he dicho, se tiene que aplicar la estandarización técnica, marcos regulatorios, y modelos de negocio que repartan el valor en beneficio del paciente.

Con los marcos regulatorios existentes, evidentemente, se tiene que respetar la dignidad de las personas cumpliendo la ley de Protección de Datos, como corresponde en el consentimiento informado escrito por el paciente.

Y si acaso fuera fructífera el uso comercial del gemelo digital, visibilizar si se puede montar una empresa con el gemelo digital que se está generando. Y será enhorabuena, porque de esa manera no solamente hay transferencia de tecnología de país a país, sino también se puede repartir, poner en valor ventajosamente una tecnología para los ciudadanos.

Los gemelos digitales del corazón tienen potencial transformador: desde mejorar decisiones clínicas en pacientes complejos hasta cambiar cómo se diseñan y regulan dispositivos cardiovasculares. Para que ese futuro se materialice, hacen

falta evidencia clínica sólida, estandarización técnica, marcos regulatorios claros y modelos de negocio que repartan el valor.

El gemelo digital cardíaco es una tecnología disruptiva que transformará la práctica clínica, los costes y la precisión terapéutica. Invertir ahora posiciona al hospital y al inversor en el núcleo de la **medicina predictiva personalizada**.

### **13.España HUB de medicina predictiva personalizada**

Las arritmias cardíacas son las enfermedades cardíacas más comunes que causan morbilidad y mortalidad. Comprender y tratar las arritmias cardíacas sigue siendo un desafío importante en el sector cardiovascular. Si bien las técnicas experimentales proporcionan información valiosa, a menudo están limitadas en resolución, escalabilidad y personalización. Es conveniente que se desarrolle una plataforma cardíaca virtual multiescalar y multi física: un marco computacional que simule la electrofisiología cardíaca desde los canales iónicos para todo el corazón. Se utilizan los modelos celulares biofísicamente detallados y personalizados, redes de conducción a nivel de tejido y con geometrías 3D precisas anatómicamente, así mismo, el gemelo digital puede permitir la exploración mecanicista de la iniciación de la arritmia, mantenimiento y terminación en condiciones fisiológicas/patológicas normales y anormales.

A la fecha, investigadores españoles colaboran en el desarrollo de gemelos digitales del corazón, en el ámbito europeo, como en el caso de un sistema que integra electrofisiología ventricular con simulaciones personalizadas para mejorar el diagnóstico y tratamiento de arritmias.

En España, las principales iniciativas de gemelos digitales del corazón se desarrollan en centros de investigación y empresas tecnológicas, dentro de la definición aceptada por EDITH (Ecosystem Digital Twins in Health) y respaldada por la Comisión Europea, que crean réplicas virtuales del corazón, o han desarrollado un sistema de mapeo cardíaco no invasivo para la monitorización en tiempo real. Estas tecnologías permiten simular el comportamiento del corazón para predecir riesgos, personalizar tratamientos y mejorar diagnósticos.

A continuación, se muestra en la tabla 4, una lista de algunos Centros de Investigación en España que ampliaremos más detalles de cómo trabajan con gemelos digitales del corazón.

CENTRO INVESTIGACION	GEMELO DIGITAL CARDIACO	HOSPITAL
<b>ELEM Biotech</b> <b>Barcelona Supercomputing Center (BSC) - Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech (UPC)</b>	<b>Virtual human twin cardiaco</b> Detectar patologías ocultas según las características de cada paciente y probar tratamientos personalizados	Hospital Clínico de Barcelona
<b>CORIFY - Modelo Mono dominio</b> <b>Servicio de Cardiología del Laboratorio de Investigación Traslacional del Marañón, del Instituto de Investigación Sanitaria, de la Unidad de Apoyo a la Innovación, y de los investigadores de la Universidad Politécnica de Valencia.</b>	<b>Mapeo global del corazón en tiempo real</b> Permite una visión detallada de su actividad eléctrica.	Hospital Universitario Gregorio Marañón
<b>VIDAA</b> <b>Universidad Pompeu Fabra (Unidad BCN MedTech del Departamento de Ingeniería)</b> <b>Plataforma VIDAA</b>	<b>Simulaciones con gemelos digitales personalizados de pacientes que van a ser operados.</b> Permite a los cardiólogos conocer anticipadamente la morfología y el flujo sanguíneo del corazón y simular escenarios posibles de la operación.	Hospital de Burdeos (Instituto-Hospital Universitario de Enfermedades del Ritmo Cardíaco)
<b>COR-ITACA Modelo Bidominio</b> <b>Universidad Politécnica de Valencia OpenCARP</b>	<b>Localizar con mayor precisión el origen de las contracciones ventriculares prematuras.</b> Mejorar la precisión de más de 30 mm a apenas 7,8 mm.	Hospital Universitario Gregorio Marañón
<b>BSICoS</b> <b>Biomedical Signal Interpretation and Computational Simulation</b> <b>Plataforma COCORO</b>	<b>Predicción de riesgo y optimización de terapias</b> Generar perspectivas nuevas para pacientes con cardiopatías hereditarias o tras infarto, usando imágenes y señales del paciente para simular "su" corazón virtual.	Hospital Clínico Universitario Lozano Blesa de Zaragoza
<b>ARTEMIs</b> <b>Instituto de Investigación Vall d'Hebron (VHIR) de Barcelona</b>	<b>Gemelos virtuales del hígado y del corazón</b> Estudiar complicaciones cardiovasculares y traducir soluciones de gemelos a la práctica clínica.	Hospital Universitario Vall d'Hebron

Tabla 4. Centros de investigación en España Fuente: Propia

La empresa *spin-off* **ELEM Biotech**, con sede en Barcelona y originada en el Barcelona Supercomputing Center (BSC), trabaja en la creación de gemelos digitales del corazón -- *virtual human twin* cardiaco -- para detectar patologías ocultas según las características de cada paciente y probar tratamientos personalizados. Además de personalizar terapias, los gemelos digitales también permiten anticipar problemas futuros en personas sanas mediante el análisis de escenarios, como un aumento repentino en el peso del sujeto. En paralelo, toda esta información también sirve para mejorar el desarrollo de equipamiento médico en general, y de marcapasos en este caso particular. **ELEM Biotech** trabaja con el Hospital Clínico de Barcelona en ensayos clínicos. {14}

En Madrid, el Hospital Universitario Gregorio Marañón presentó **CORIFY** con certificación CE, un sistema que utiliza un chaleco especializado con electrodos e inteligencia artificial para crear un mapeo global del corazón en tiempo real, permitiendo una visión detallada de su actividad eléctrica. CORIFY ha sido el fruto de 20 años del Servicio de Cardiología del Laboratorio de Investigación Traslacional del Marañón, del Instituto de Investigación Sanitaria, de la Unidad de Apoyo a la Innovación, y de los investigadores de la Universidad Politécnica de Valencia. Se han centrado en ayudar a prever la causa de las fibrilaciones auriculares utilizando el modelo in silicio (ecuación mono dominio) que permite simular el corazón después de una captura de datos durante un periodo de 10 minutos, a fin de alimentar el algoritmo predictivo ya ajustado para el paciente que se le está atendiendo. {15}

Se trata, que cuando un paciente llega con patología cardiaca, se le coloca unos sensores en el pecho y espalda y a continuación, después de un protocolo que tienen allí y al cabo de 10 minutos, se tiene en la pantalla el corazón del paciente dibujado en 3D y latiendo de manera síncrona con la del paciente. Entonces, el médico puede estar viendo cuál la actividad eléctrica de forma detallada en cada parte del corazón. Además, el médico está revisando qué actividad eléctrica tiene ese corazón en directo y la IA le está informando posibles disfunciones o simplemente el estado del corazón del paciente para la siguiente hora.

Así mismo con la plataforma **VIDAA**, tenemos a los investigadores de la Universidad Pompeu Fabra (Unidad BCN MedTech del Departamento de Ingeniería) y el Hospital de Burdeos (Instituto-Hospital Universitario de Enfermedades del Ritmo Cardíaco) que han creado simulaciones con gemelos digitales personalizados de pacientes que van a ser operados, ya que les permite a los cardiólogos conocer anticipadamente la morfología y el flujo sanguíneo del corazón y simular escenarios posibles de la operación. Utilizan la plataforma

**VIDAA** que permite generar copias virtuales de la aurícula izquierda de los pacientes con fibrilación auricular. {16}

De otro lado, un equipo de investigadores españoles de la Universidad Politécnica de Valencia perteneciente al grupo **COR-ITACA** {17}, han desarrollado una técnica pionera que combina imagen electrocardiográfica (ECGI) con gemelos digitales personalizados para localizar con mayor precisión el origen de las contracciones ventriculares prematuras, otra forma frecuente de arritmia que puede ser potencialmente peligrosa. Esta metodología innovadora ha logrado reducir drásticamente el margen de error en la localización del foco arritmico, mejorando la precisión de más de 30 mm a apenas 7,8 mm. Esta mejora en la precisión diagnóstica es crucial, ya que una localización incorrecta puede comprometer significativamente la eficacia de tratamientos como la ablación por catéter, un procedimiento que requiere una precisión milimétrica para ser exitoso. El modelo bidominio se resolvió utilizando la plataforma OPENCARP para simular la propagación eléctrica en el miocardio ventricular y los campos eléctricos a través del torso. En fase de validación para ampliar tipos de arritmias. {18}

Bajo el Proyecto finalizado denominado **DIGICARDIO** (Digital transformation of clinical practice by using patient-specific cardiac digital twins) la Universidad de Zaragoza conjuntamente con la Unidad de Arritmias del Servicio de Cardiología del Hospital Clínico Universitario Lozano Blesa de Zaragoza plantearon crear gemelos digitales personalizados del corazón usando datos clínicos, imágenes, señales electrocardiográficas, para predicción de riesgo y optimización de terapias (terapia de resincronización, selección de pacientes post-infarto para desfibriladores). El hospital participa activamente en la creación de gemelos y en la producción de un volumen sostenido de casos. Así mismo, dentro del grupo **Biomedical Signal Interpretation and Computational Simulation (BSICoS)** que forma parte del instituto universitario de investigación en ingeniería de Aragón - Universidad de Zaragoza, continúan generando perspectivas nuevas para pacientes con cardiopatías hereditarias o tras infarto, usando imágenes y señales del paciente para simular “su” corazón virtual. Así mismo han creado la plataforma **COCORO**, un solucionador basado en WebGPU de vanguardia para un cálculo y renderizado eficientes para abordar la complejidad de los modelos electrofisiológicos cardíacos in silico. Catorce investigadores del grupo BSICoS participaron en el Congreso de Computación en Cardiología, realizado en São Paulo, Brasil, del 14 al 17 de septiembre de 2025, donde tuvieron la oportunidad de presentar sus investigaciones sobre salud cardíaca. {19}

El Instituto de Investigación Vall d’Hebron (VHIR) de Barcelona participa en el proyecto europeo AcceleRating the Translation of virtual twins towards a

Personalized Management of fatty liver patients (**ARTEMIs**) que usan gemelos virtuales del hígado y del corazón para estudiar complicaciones cardiovasculares y traducir soluciones de gemelos a la práctica clínica. {20}

Entonces, lo principal es que siempre que queramos montar un gemelo digital, se debe tener habilitado un **Centro de Investigación**, verificar la masa crítica de **investigadores**, tanto médicos cardiólogos, como también ingenieros para discernir sobre la electrostática y la electrofisiología del corazón. Y lo más importante está en el tercer grupo: **los pacientes**, porque se tiene que trabajar con terapias y tratamientos de casos patológicos reales, para que el entrenamiento de la IA sea válido, como también para que los datos clínicos de los pacientes sean comprobados y validados con los datos de simulación del gemelo digital, por lo cual, la participación de los hospitales es crucial, como en el caso de CORIFY, ha funcionado y funciona, porque tiene un patrón de pacientes reales, favoreciendo una atención personalizada a los pacientes.

De tal forma que, con estos 3 vectores, **centros de investigación** para saber qué patología abordar, la **masa crítica de médicos e ingenieros**, y **los pacientes**, será posible para llevar a cabo el montaje de un gemelo digital.

Y es muy importante que se utilice este conocimiento, para una primera invitación a centros de investigación o institutos, para ver si tenemos o no la masa crítica y si no formarlas, a continuación, tener acuerdos con hospitales. Y luego conjuntamente, ver qué tipo de patología se puede estudiar para ayudar al potencial 23% de corazones peruanos.

Sabemos de qué cualquier en cualquier población, tienen por lo menos el 30% arritmias, y no lo saben y no se atienden. Entonces, hagamos lo posible para utilizar esta herramienta, entonces no se trata, de que se haga diagnóstico de pacientes tipo, si no, tenemos la posibilidad de que cada corazón se analice desde su singularidad, su historia, su particular latido.

#### 14. Gemelos digitales del corazón humano en América Latina

En América Latina el uso clínico rutinario de gemelos digitales cardíacos aún es muy incipiente: la mayor parte de la actividad pública que aparece en la literatura y en prensa corresponde a proyectos de I+D, las instituciones muestran interés, posible infraestructura o antecedentes tecnológicos que permitirían pilotos académicos o iniciativas privadas/empresariales, pero hay escasas pruebas públicas claras de despliegues hospitalarios a gran escala o un despliegue clínico integrado y continuo en la región al día de hoy.

## 15. Conclusiones

El presente artículo tiene como finalidad generar un entorno de intercambio de conocimiento, experiencias e innovación entre todos los agentes implicados en el despliegue de la salud conectada en Lima. El propósito es avanzar colectivamente hacia una transformación digital del sistema sanitario que sea sostenible, centrada en la ciudadanía y alineada con los principios de equidad, calidad y eficiencia.

El modelo mono dominio es una simplificación matemática del modelo bidominio, que representa los espacios intracelular y extracelular, pero reduciendo la complejidad a una sola ecuación de difusión para la divergencia potencial transmembrana.

La descripción de la actividad eléctrica tiene mucha relación con el volumen de células que entran como parámetro de homogeneización del grupo de células a modelar, porque también depende la cantidad de membrana a simular con el modelo mono dominio. Sin embargo, es posible que diferentes volúmenes realmente no sean homogéneos y reaccionen de forma diferente clínicamente, pero el tratamiento con el modelo mono dominio no los diferencia.

También como un aspecto importante, la colaboración y la integración digital. Es absolutamente clave que los ecosistemas de investigación, económicos y productivos de las instituciones para las que trabajamos, compartan datos, tengan interoperabilidad de sus soluciones, de sus aplicaciones, hablen el mismo lenguaje a nivel de gobierno del dato, a nivel de semántica, a nivel de ontologías, a nivel de lenguaje, de diccionario que utilizan los mismos conceptos coherentes. En definitiva, la colaboración y la integración digital, que los datos nazcan digitales y viajen digitales.

Se dejó claro que el modelo de gemelo digital es un conjunto de principios: la colaboración público-privada, inversión en infraestructuras digitales resilientes, la integración de los datos y, sobre todo, una visión estratégica a largo plazo que de relevancia al paciente.

Los gemelos digitales del corazón tienen un potencial transformador: desde mejorar decisiones clínicas en pacientes complejos hasta cambiar cómo se diseñan y regulan dispositivos cardiovasculares. Para que ese futuro se materialice, hacen falta evidencia clínica sólida, estandarización técnica, marcos regulatorios claros y modelos eficientes para un buen resultado orientar lo que con lleva en mejorar la salud de las personas negocio que repartan el valor.

El gemelo digital cardíaco es una tecnología disruptiva que transformará la práctica clínica, los costes y la precisión terapéutica. Invertir ahora posiciona al

hospital y al inversor en el núcleo de la **medicina predictiva personalizada**. Respecto a la vida humana que se benefician y de la eficiencia de los medios partiendo de que como sería una buena inversión puesto que hay pocos.

Desde el siglo pasado, la medicina hace uso copiosamente y sin restricciones de la estadística, de los sistemas expertos y, ahora, de la IA. La IA está cruzando la línea fina de comprender a los humanos, puesto que se está creando máquinas que se relacionan directamente con nuestro intelecto. ¿El camino está abierto para que la IA ayude más al médico? No lo tenemos todavía, pero los tendremos.

## 16. Referencias

{1} Open Software and Tools for Digital Twins of the Heart - Computing in Cardiology Brazil 2025 Sep 14 – 17, 2025;

Blanca Rodriguez<sup>1</sup> and Rodrigo Weber dos Santos<sup>2</sup>

<sup>1</sup>University of Oxford, - Head of Computational Biology and Health Informatics <sup>2</sup>Federal University of Juiz de Fora

{2} A bi-domain model for describing ischemic myocardial d-c potentials. Author(s) Tung, Leslie; Thesis. 1978. Ph.D.--Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Electrical Engineering and Computer Science.

{3} Ionic mechanisms underlying human atrial action potential properties: insights from a mathematical model. Author(s): MARC COURTEMACHE,<sup>1,2</sup> RAFAEL J. RAMIREZ,<sup>1</sup> AND STANLEY NATTEL<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup>Research Center, Montreal Heart Institute, Montreal, Quebec H1T 1C8; <sup>2</sup>De'partements de <sup>3</sup>Physiologie and <sup>4</sup>Me'decine, Universite' de Montre'al, Montreal, Quebec H3C 3J7; and

<sup>3</sup>Department of Pharmacology, McGill University, Montreal, Quebec H3G 1Y6, Canada

{9} OpenCOR <https://www.cellml.org/getting-started/tutorials/opencordemo>

{10} cellML <https://models.cellml.org/exposure/0e03bbe01606be5811691f9d5de10b65>

[https://www.researchgate.net/publication/13596150\\_Ionic\\_mechanisms\\_underlying\\_human\\_atrial\\_action\\_potential\\_properties\\_Insights\\_from\\_a\\_mathematical\\_model](https://www.researchgate.net/publication/13596150_Ionic_mechanisms_underlying_human_atrial_action_potential_properties_Insights_from_a_mathematical_model)

{11} OpenCARP <https://opencarp.org/> <https://www.kit.edu/>

{12} Computational Biology & Health Informatics  
<https://www.cs.ox.ac.uk/research/compbio/>

{13} Chaste <https://chaste.github.io/>

{14} The Virtual Humans Factory and Barcelona Supercomputing Center (BSC)

<https://www.elem.bio/>

{15} Corify Care, sistema no invasivo de mapeo del corazón en tiempo real:

<https://www.comunidad.madrid/noticias/2025/03/03/hospital-publico-gregorio-maranon-crea-primer-sistema-mundo-no-invasivo-mapeo-global-corazon-tiempo-real>

<https://elpais.com/sociedad/2025-03-03/el-gregorio-maranon-crea-el-primer-sistema-del-mundo-que-mapea-el-corazon-en-diez-minutos-sin-tecnicas-invasivas.html>

{16} Crean gemelos digitales del corazón para poder realizar simulaciones que reduzcan los riesgos de las operaciones de arritmias

<https://www.immedicohospitalario.es/noticia/48544/crean-gemelos-digitales-del-corazon-para-poder-realizar-simulaciones.html>

{17} Grupo COR-ITACA: Universitat Politècnica de València, Instituto de Ingeniería Biomédica - Valencia, Instituto de Tecnología de Karlsruhe (KIT) – Alemania, Departamento de Cardiología del Hospital General Gregorio Marañón y el Instituto de Investigación Sanitaria Gregorio Marañón (IISGM), Corify Care SL., Departament de Matemàtiques de la Universitat Autònoma de Barcelona, Centro de Investigación Biomédica en Red de Enfermedades Cardiovasculares (CIBERCV), Universidad Complutense de Madrid.

{18} Un gemelo digital del corazón ayuda a mejorar el diagnóstico y tratamientos de arritmias cardíacas

<https://ruvid.org/un-gemelo-digital-del-corazon-ayuda-a-mejorar-el-diagnostico-y-tratamientos-de-arritmias-cardiacas>

<https://www.upv.es/noticias-upv/noticia-15126-gemelo-digital-es.html>

<https://doi.org/10.1016/j.compbimed.2025.109994>

{19} Digital transformation of clinical practice by using patient-specific cardiac digital twins for risk prediction and therapy optimization (DIGICARDIO) – TED2021-130459B-I00

<https://bsicos.i3a.es/digital-transformation-of-clinical-practice-by-using-patient-specific-cardiac-digital-twins-for-risk-prediction-and-therapy-optimization-digicardio-ted2021-130459b-i00/>

Starts a new project to create digital twins of the heart

<https://bsicos.i3a.es/starts-a-new-project-to-create-digital-twins-of-the-heart/>

{20} Nace la iniciativa ARTEMIs para estudiar el hígado graso y sus complicaciones cardiovasculares mediante gemelos virtuales

<https://vhir.vallhebron.com/es/sociedad/noticias/nace-la-iniciativa-artemis-para-estudiar-el-higado-graso-y-sus-complicaciones-cardiovasculares-mediante-gemelos-virtuales>

## **Exceso y Deficiencia de Vitamina B12: Consecuencias Clínicas e Interacciones Antioxidantes con el Glutatión**

MSc. Ing. Roque Masciarelli

Universidad Tecnológica Nacional, facultad Regional Rosario, Argentina

roque.masciarelli@gmail.com

Citar: J. PAIME, 2025, 4, 52-60

Rosario, 12 de diciembre 2025

### **Resumen**

Esta revisión analiza las consecuencias clínicas tanto del consumo excesivo como de la deficiencia de vitamina B12, y explora su interacción bioquímica con el glutatión. El consumo excesivo se ha asociado con náuseas, trastornos digestivos, fracturas óseas, disfunción renal y síntomas neurológicos. La deficiencia está bien establecida como causa de anemia perniciosa, neuropatías, debilidad y fatiga, y puede incrementar indirectamente el estrés oxidativo al alterar el equilibrio del glutatión. Más allá de estos hechos clínicos, el manuscrito plantea la hipótesis de que la vitamina B12 podría ejercer efectos antioxidantes a través de sus características estructurales y su sinergia con el glutatión. Esta perspectiva interpretativa resalta el posible papel de la B12 en la mitigación del estrés oxidativo y de enfermedades relacionadas con la edad, lo que requiere validación experimental adicional.

### **Palabras clave:**

- Vitamina B12
- Cobalamina
- Glutatión
- Estrés oxidativo
- Defensa antioxidante
- Anemia perniciosa
- Enfermedades neurodegenerativas
- Especies reactivas de oxígeno (ROS)

## **Vitamin B12 Excess and Deficiency: Clinical Consequences and Antioxidant Interactions with Glutathione**

MSc. Ing. Roque Masciarelli

Universidad Tecnológica Nacional, facultad Regional Rosario, Argentina

roque.masciarelli@gmail.com

Citar: J. PAIME, 2025, 4, 42-48

Rosario, 12 de diciembre 2025

### **Abstract**

This review examines the clinical consequences of both excessive intake and deficiency of vitamin B12, while exploring its biochemical interplay with glutathione. Excessive consumption has been associated with nausea, digestive disorders, bone fractures, kidney dysfunction, and neurological symptoms. Deficiency is well established as a cause of pernicious anemia, neuropathies, weakness, and fatigue, and may indirectly increase oxidative stress by impairing glutathione balance. Beyond these clinical facts, the manuscript hypothesizes that vitamin B12 may exert antioxidant effects through structural features and its synergy with glutathione. This interpretive perspective highlights the potential role of B12 in mitigating oxidative stress and age-related diseases, warranting further experimental validation.

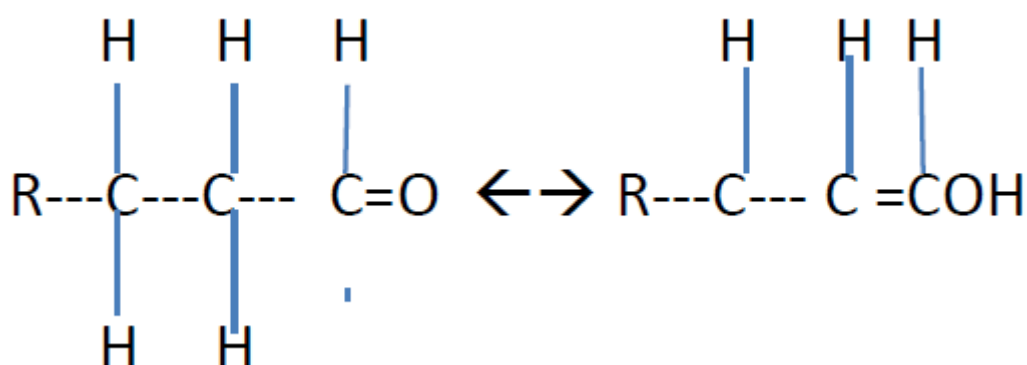
### **Keywords**

- Vitamin B12
- Cobalamin
- Glutathione
- Oxidative stress
- Antioxidant defense
- Pernicious anemia
- Neurodegenerative diseases
- Reactive oxygen species (ROS)

## 1. Antecedentes

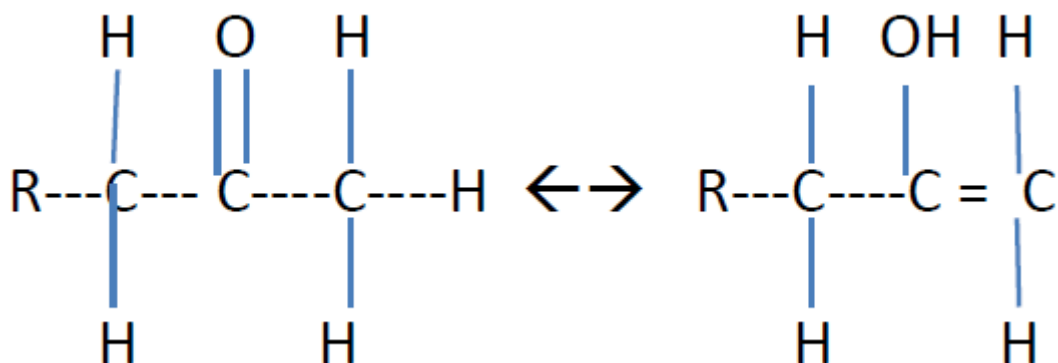
Basado en conocimientos anteriores sobre las estructuras químicas desarrolladas de los polifenoles y flavonoides de vegetales, comparadas con las estructuras en equilibrio de sus formas genéricas aldehídicas y cetónicas, relacionadas con los polialcoholes y cetonas, he deducido observando la compleja estructura de la vitamina B12, que podrían existir posibilidades de encontrar algunas cualidades antioxidantes, ya sea directa como indirectamente.

Estructura aldehídica del aldehído u cetónica  $\leftrightarrow$  Estructura enólica de ambas



**Figura 1.** Forma aldehídica del aldehído

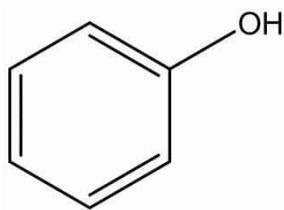
Forma enólica del aldehído



**Figura 2.** Forma cetónica de la acetona

Forma enólica de la acetona  
(considerado un alcohol secundario)

Como el fenol es una estructura alcohólica, también comercialmente, se lo suele conocer como ácido fénico. En rigor, tomando como base la estructura del mismo y de acuerdo a sus formas de resonancia, surge la estructura del ion fenóxido (Figura 3) donde el átomo de oxígeno unido al anillo, queda rodeado de seis electrones, de los cuales, comparte uno con el enlace covalente del anillo y otro con el del hidrógeno.

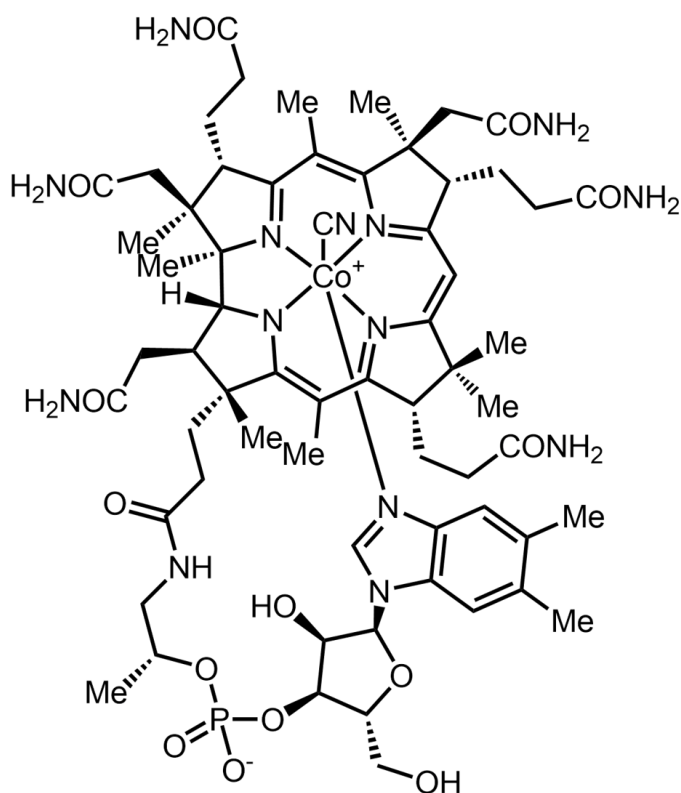


**Figura 3.** Estructura del ion fenóxido

El ion fenóxido expuesto por los cinco electrones restantes, conformándolo también como un radical libre, mientras que el correspondiente al átomo de hidrógeno, lo hace con un electrón, constituyendo per se un radical libre, ya que posee un electrón no apareado  $H^*$ . Ambos, con un número impar de electrones buscarán la manera de estabilizarse robando un electrón de otra molécula, estabilizándola. Obviamente que ambos se desplazan conjuntamente oxidándose.

En general, los antioxidantes ejercen su actividad eliminando radicales libres, proporcionándoles electrones o hidrógeno. En consonancia con este mecanismo, un antioxidante interactúa directamente con un radical libre y neutraliza sus electrones libres.<sup>1</sup>

De acuerdo a lo expresado anteriormente, surge mi análisis comparativo de la estructura de la vitamina B12, para asimilarla a su posible capacidad antioxidante.



**Figura 4.** Estructura química desarrollada de la Vitamina B12, también denominada cianocobalamina, donde pueden observarse dos grupos oxhidrilo y un grupo cetónico.

La vitamina B12 (Figura 4), es una de las más complejas y la única que presenta un núcleo central metálico de cobalto; dando lugar a las cobalaminas, que adoptan diferentes estructuras químicas, según la variación del estado de oxidación del cobalto ( $\text{Co}^{+1}$ ,  $\text{Co}^{+2}$  o  $\text{Co}^{+3}$ ).

La cobalamina es hidrosoluble, esencial para el normal funcionamiento del cerebro, del sistema nervioso, la formación de la sangre y de varias proteínas. Está involucrada en el metabolismo de las células del cuerpo humano, síntesis y regulación del ADN, aminoácidos, ácidos grasos y glúcidos- Su biosíntesis se produce solo por bacterias, generando hidroxicobalamina, pero la conversión entre las distintas vitaminas B12, se producen en el cuerpo humano. Una forma semisintética de la misma es la cianocobalamina, de amplio uso en productos farmacéuticos, suplementos vitamínicos, y aditivos alimentarios. La vitamina B12, predomina en los siguientes alimentos: germen de trigo-carne-huevos-pescados y verduras.<sup>2</sup>

## 2. MATERIALES Y METODOS

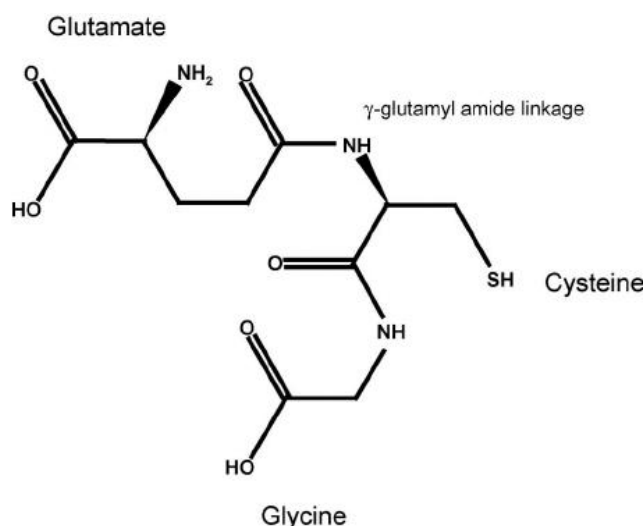
**La interacción entre la Vitamina B12 y glutatión** fue descubierta por su relación con la anemia perniciosa, que destruye las células epiteliales, las que son encargadas de la secreción del ácido estomacal y de la producción del glutatión, potente antioxidante metabólico que resulta crucial para la absorción de la B12. La B12, ingerida como suplemento, para ser convenientemente absorbida, primeramente, debe interactuar con el **Factor intrínseco (FI)**, glicoproteína, generada por las células epiteliales del estómago) y producen el glutatión reducido, el cual es un poderoso antioxidante que neutraliza las especies reactivas de oxígeno, actuando como defensa del organismo. El FI, ayuda a la absorción, para que la B12 pueda pasar al torrente sanguíneo, cosa que se produce en la parte inferior del intestino delgado. La vitamina B12, se produce en mayor proporción en el hígado y está constituida por varias estructuras isómeras complejas, como la cianocobalamina, generalmente utilizada en la formulación de suplementos. La cianocobalamina, activa la formación del glutatión disminuyendo los niveles del ion superóxido que es un poderoso oxidante y esto no conduce a incrementar el estrés oxidativo y la aparición de enfermedades vinculadas con la edad: Alzheimer-Parkinson-diabetes tipo 2. <sup>3</sup> De manera informativa, se puede agregar la existencia de compuestos polifenólicos, derivados de los vegetales destacada acción antioxidante, que contribuyen a neutralizar a los radicales libres formados metabólicamente en el organismo. <sup>4</sup>

El glutatión se forma en el interior de las células, para proteger del daño oxidativo a todo el cuerpo, incluyendo el estómago. Es decir, el glutatión participa en el proceso de desintoxicación y de regeneración celular, se encuentra presente en el estómago, pero su síntesis no está relacionada con la B12 en dicha ubicación. La síntesis del glutatión,

ocurre principalmente en todos los órganos, incluyendo el revestimiento epitelial del estómago, mediante dos etapas enzimáticas.

### 3. Estructura química desarrollada del glutatión reducido.

En la cual pueden observarse dos grupos ceto, característicos



**Figura 5.** Estructura del glutatión reducido.<sup>5</sup>

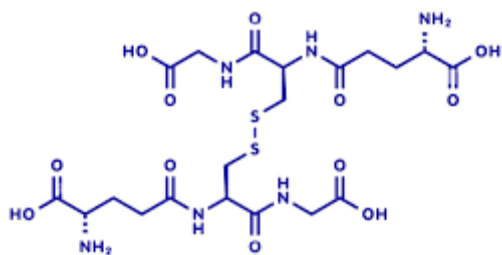
La carencia de B12 y de FI provocan anemia perniciosa. Químicamente el glutatión es un tripéptido, constituido por los aminoácidos: glutámico, cisteína y glicina. Actúa como el principal antioxidante celular; protege células hepáticas, y neutraliza a productos químicos tóxicos (RADICALES LIBRES) o especies reactivas de oxígeno (ROS). Así su forma de glutatión reducido (sulfhidrato), al captar electrones no apareados de los ROS, se transforma en disulfuro.<sup>6</sup>

El glutatión predomina en las crucíferas (brócoli, coliflor, espinacas, calabazas, semillas, espárragos), ajo, cebollas, aguacate, carnes magras y productos de origen animal como carne de pollo, de ternera y productos lácteos crudos o poco procesados. Estos alimentos, no solo proporcionan glutatión directamente, sino que también aportan aminoácidos y azufre, para que el organismo sintetice su propio glutatión.

### 4. Reacción antioxidante del glutatión

Ante la presencia de ROS, que representamos como la oxidante agua oxigenada. Se da la reacción: iones sulfhidrato → iones disulfuro





**Figura 6.** Estructura del glutatión oxidado.

Dicha reacción, expresa oxidación del glutatión reducido. El glutatión, conjuntamente con la vitamina B12, actúan como un tampón celular, manteniendo un verdadero equilibrio inmunológico, en células y tejidos sanos, la versión reducida, alcanza más del 90% y menos del 10 %, lo hace en su forma disulfuro u oxidada. Desempeña un rol fundamental en numerosas reacciones metabólicas y bioquímicas, tales como síntesis y reparación de ADN, transporte de aminoácidos y actividad de enzimas. Por lo tanto, los sistemas del organismo, pueden verse afectados, por el estado del sistema glutatión, influyendo en el sistema nervioso, gastrointestinal y los pulmones. <sup>6</sup>

Para la clínica médica, generalmente se designa glutatión para el estado oxidado, correspondiente a la formación de iones disulfuro. <sup>7</sup>

Normalmente Las células eucariotas, extinguen continuamente a los radicales libres a través de antioxidantes endógenos. Además, la B12, puede estimular indirectamente la eliminación de las ROS, mediante la preservación del glutatión. <sup>8, 9</sup>

## 5. Relaciones clínicas importantes sobre el estado de un cuerpo sano

Así se define la siguiente relación con datos analíticos, que permiten brindar un panorama clínico de los pacientes con algún tipo de cáncer.

**a-Glutatión reducido/ glutatión oxidado < 1;** indica un peor estado de salud, respecto a un estado de control

El glutatión oxidado, para análisis clínicos de pacientes con cáncer de cerebro, mama y de pulmón, de cuello uterino tiende a ser elevado

**b-Glutatión reducido/ glutatión oxidado > 1,** indica un mejor estado de salud con referencia a un estado de control

O sea, los carcinomas con grados elevado indican niveles de glutatión más bajos. <sup>10</sup>

Eventualmente podría definirse un grado de conversión en la reacción química oportunamente planteada, respecto al glutatión reducido. Definición obtenida del concepto de conversión <sup>11</sup>

Contenido de glutatión inicial o de control =Cgi

Contenido de glutatión en un estado posterior=Cgp

Luego: la Conversión glutatión reducido = (Cgi - Cgp)/Cgi

## 6. RESULTADOS

Por otra parte Meister y Anderson <sup>12</sup> reportaron para acción tampón del glutatión , valores de concentración oscilando entre 0.5-10 mM

**Potenciales de oxido-reducción, para el glutatión reducido, en función del pH**

pH	Potencial de reducción
7.4	-264 mV
7	-240 mV

## 7. Ingesta diaria recomendada de Vitamina B12

La ingesta diaria recomendada para hombres y mujeres adultas es de 2.4 micro g/día. Aunque estudios recientes, <sup>13</sup> proponen que una dieta de 6 micro gr/día puede resultar más adecuada, para la población en general. El estrés oxidativo ocurre cuando la presencia de ROS, exceden la capacidad amortiguadora disponible.<sup>14, 15</sup>

## 8. CONCLUSIONES

Clínicamente, tanto el exceso como la deficiencia de vitamina B12 tienen consecuencias importantes para la salud, que incluyen síntomas digestivos y neurológicos, así como anemia perniciosa. Desde el punto de vista bioquímico, la vitamina B12 favorece el metabolismo del glutatión, contribuyendo indirectamente a la defensa antioxidante. Aunque el papel antioxidante directo de la B12 sigue siendo hipotético, su sinergia con el glutatión ofrece un mecanismo plausible para reducir las especies reactivas de oxígeno y mantener el equilibrio redox celular. Esta doble perspectiva—evidencia clínica establecida e hipótesis bioquímicas interpretativas—subraya la importancia de una ingesta adecuada de B12 y señala áreas para futuras investigaciones.

## 9. CONCLUSIONS

Clinically, both excess and deficiency of vitamin B12 have significant health consequences, ranging from digestive and neurological symptoms to pernicious anemia. Biochemically, vitamin B12 supports glutathione metabolism, indirectly contributing to antioxidant defense. While the direct antioxidant role of B12 remains hypothetical, its synergy with glutathione provides a plausible mechanism for reducing reactive oxygen species and maintaining cellular redox balance. This dual perspective—established clinical evidence and interpretive biochemical hypotheses—underscores the importance of adequate B12 intake and highlights areas for future research.

## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Piluzza G, Bullitta S. Correlations between phenolic content and antioxidant properties in twenty-four plant species of traditional ethnoveterinary use in the Mediterranean area. *Pharm Biol.* 2011;49(3):240-7. doi:10.3109/13880209.2010.501083.
2. Sinclair L. Recognizing, treating and understanding pernicious anaemia. *J R Soc Med.* 2008;101(5):262-4. doi:10.1258/jrsm.2008.081006.
3. Calderón-Ospina CA, Nava-Mesa MO. B Vitamins in the nervous system: Current knowledge of the biochemical modes of action and synergies of thiamine, pyridoxine, and cobalamin. *CNS Neurosci Ther.* 2020;26(1):5-13. doi:10.1111/cns.13207.
4. Pérez-Jiménez J, Arranz S, Tabernero M, Díaz-Rubio ME, Serrano J, Goñi I, Saura-Calixto F. Updated methodology to determine antioxidant capacity in plant foods, oils and beverages: Extraction, measurement and expression of results. *Food Res Int.* 2008;41(3):274-85. doi:10.1016/j.foodres.2007.12.004.
5. Franco R, Schoneveld OJ, Pappa A, Panayiotidis MI. The central role of glutathione in the pathophysiology of human diseases. *Arch Physiol Biochem.* 2007;113(4-5):234-58. doi:10.1080/13813450701661198.
6. Meister A. Glutathione metabolism and its selective modification. *J Biol Chem.* 1988;263(33):17205-8. doi:10.1016/S0021-9258(19)77815-6.
7. Damodaran S, Parkin KL, Fennema OR. Fennema's Food Chemistry. Boca Raton: CRC Press; 2007.
8. Manzanares W, Hardy G. Vitamin B12: the forgotten micronutrient for critical care. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care.* 2010;13(6):662-8. doi:10.1097/MCO.0b013e32833dfaec.
9. Karamshetty V, Acharya JD, Ghaskadbi S, Goel P. Mathematical modeling of glutathione status in type 2 diabetics with vitamin B12 deficiency. *Front Cell Dev Biol.* 2016;4:16. doi:10.3389/fcell.2016.00016.
10. Gamcsik MP, Kasibhatla MS, Teeter SD, Colvin OM. Glutathione levels in human tumors. *Biomarkers.* 2012;17(8):671-91. doi:10.3109/1354750X.2012.715672.
11. Levenspiel O. Chemical Reaction Engineering. 3rd ed. New Delhi: Wiley India Pvt. Limited; 2006.
12. Meister A, Anderson ME. Glutathione. *Annu Rev Biochem.* 1983;52:711-60. doi:10.1146/annurev.bi.52.070183.003431.
13. Bor MV, Lydeking-Olsen E, Møller J, Nexø E. A daily intake of approximately 6 µg vitamin B-12 appears to saturate all the vitamin B-12-related variables in Danish postmenopausal women. *Am J Clin Nutr.* 2006;83(1):52-8. doi:10.1093/ajcn/83.1.52.
14. Czerska M, Mikołajewska K, Zieliński M, Gromadzińska J, Wąsowicz W. Today's oxidative stress markers. *Med Pr.* 2015;66(3):393-405. doi:10.13075/mp.5893.00137.
15. Pisoschi AM, Pop A. The role of antioxidants in the chemistry of oxidative stress: A review. *Eur J Med Chem.* 2015;97:55-74. doi:10.1016/j.ejmech.2015.04.040.

# Aplicación de selectividad lógica y protección adaptativa para una red de media tensión hospitalaria

Enrique Salazar Jaramillo  
[ensaja50@gmail.com](mailto:ensaja50@gmail.com)

Citar: J. PAIME, 2025, 4, 61-69  
13 de diciembre de 2025

**Resumen** — En el presente artículo se describe la aplicación de selectividad lógica y protección adaptativa en una red radial de 20 KV para un hospital, con topología variable de la red. En redes de distribución en media tensión, radiales, se presentan esquemas en los cuales los relés se encuentran en cascada y el criterio de selectividad amperimétrica y/o cronométrica, para una coordinación efectiva de la protección contra cortocircuitos, no es posible. Por un lado, las corrientes de cortocircuito son prácticamente iguales y por otro, los ajustes de disparo instantáneo, en los dispositivos de protección del suministro son muy cortos. Esto requiere aplicar otros métodos de selectividad de protección. Los relés numéricos modernos pueden comunicarse entre ellos, lo que permite realizar una selectividad lógica y de ese modo mantener un tiempo corto, igual para todos los relés en cascada y menor que el tiempo de disparo de la protección de la red de suministro, logrando de este modo una perfecta selectividad. Algunos relés también disponen de dos o más grupos de ajuste, que se pueden fijar previamente, en base al cálculo de las corrientes de cortocircuito o corrientes de carga para las diferentes configuraciones, esto permite aplicar lo que se llama protección adaptativa.

**Abstract** — This article describes the application of logical selectivity and adaptive protection in a 20-kV radial network supplying a hospital, under variable network topology. In medium-voltage radial distribution networks, protection schemes are often arranged with relays in cascade, where the principle of time-current selectivity—either amperimetric or time-graded—cannot be achieved for effective short-circuit protection coordination. On one hand, the short-circuit currents at the different protection points are practically the same, and on the other, the instantaneous trip settings of the upstream protection devices are very short. This requires the application of alternative protection selectivity methods. Modern numerical relays are capable of communicating with each other, which enables the implementation of logical selectivity, thereby allowing all relays in cascade to operate with a short and identical trip time, but still lower than the trip time of the utility's upstream protection, thereby achieving perfect selectivity. Some relays also provide two or more setting groups that can be pre-configured based on calculated short-circuit currents or load currents for the different network configurations. This makes it possible to apply what is known as adaptive protection.

**Términos clave** — Media tensión, protección, selectividad lógica, protección adaptativa, relés de protección.

## I INTRODUCCIÓN

En las redes de media tensión con capacidades de cortocircuito de cierta magnitud, se requiere de interruptores automáticos para interrumpir las corrientes de falla más elevadas (10 kA y mayores). Los interruptores automáticos no tienen inteligencia de disparo propia y deben utilizarse junto con los relés. Son los relés los que proporcionan la inteligencia y la lógica de control para disparar los interruptores automáticos. <sup>[1],[4]</sup>

Siendo la continuidad del servicio, esto es, la ausencia de interrupciones en el suministro, especialmente importante en instalaciones eléctricas hospitalarias, la *selectividad* juega un rol primordial. La selectividad, se refiere a que solo los dispositivos de protección más cercanos a una falla operarán para eliminar el componente fallado. Esto implica una gradación del umbral, la temporización o las características operativas del dispositivo de protección <sup>[1]</sup>. Para lograr selectividad se tiene que determinar los ajustes graduales de los dispositivos de protección, esto la *coordinación*.

Esta selectividad tradicionalmente se realiza ajustando en los relés, los umbrales de disparo de corriente, los tiempos de disparo o mediante una combinación de ambos en forma escalonada. Sin embargo, estos métodos pueden resultar imposibles de aplicarlos si las corrientes de falla son similares, de tal modo que no haya una diferencia discriminante entre ellas y que además los tiempos de disparo que fija el distribuidor sean muy cortos, de tal modo que el escalonamiento de los tiempos de los relés aguas debajo de la protección del distribuidor, superarían el tiempo de disparo dado por este.

Gracias a los relés numéricos modernos, que permiten una comunicación entre ellos es posible realizar una *selectividad lógica* y mantener un tiempo corto, igual para todos los relés en cascada, y menor que el tiempo de la protección del distribuidor, consiguiendo de este modo una perfecta selectividad.

Además, muchos relés numéricos, disponen de dos o más grupos de ajuste, seleccionable por comunicación. Esto es particularmente útil, si la configuración de la red eléctrica del consumidor por razones de operatividad puede cambiar su topología. Este tipo de protección es una forma básica de *protección adaptativa*.

## II MÉTODOS DE SELECTIVIDAD TRADICIONALES

Dentro de los métodos tradicionales de selectividad se utiliza la selectividad amperimétrica, la selectividad cronométrica y una combinación de las dos.

En la Figura 1, se muestra un diagrama unifilar de una red radial, con dos subestaciones A y B en cascada. Un cortocircuito trifásico en barras de la subestación B, produce una corriente  $I_{CCB}$ , que será “vista” únicamente por el relé de protección de la subestación B, el relé de la subestación A no se “entera”. Sin embargo, un cortocircuito trifásico en la subestación A, produce una corriente  $I_{CCA}$  que será “vista” por ambos relés. Para un cortocircuito en la subestación B, no sería necesario tener en cuenta ninguna selectividad; sin embargo, si se produce un cortocircuito en las barras de la subestación A, como ambos relés ven la falla, se tiene aplicar algún método de selectividad para que disipe la falla el interruptor que se encuentra más cercano a ella (en este caso debe ser el de la subestación A).

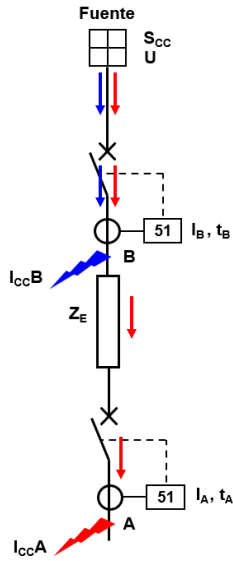


Figura 1. Diagrama unifilar donde se indican las corrientes de cortocircuitos  $I_{ccA}$  e  $I_{ccB}$  en las estaciones A y B respectivamente, así como los ajustes de corriente y tiempo  $I_a$ ,  $t_a$  e  $I_b$ ,  $t_b$  de los relés de protección ubicados en cada subestación

Del esquema de la Figura 1 y los conocimientos básicos de sistemas de potencia, podemos establecer las siguientes relaciones. La impedancia equivalente  $Z_s$  ( $\Omega$ ), vista desde la subestación B, aguas arriba estará dada en este caso por

$$Z_s = \frac{U^2}{S_{cc}} \quad (1)$$

Donde

$U$  tensión nominal del sistema (kV)  
 $S_{cc}$  potencia de cortocircuito en el punto de suministro (MVA)

Por lo tanto, la corriente de cortocircuito trifásica en las barras de la subestación B será

$$I_{ccB} = \frac{U}{\sqrt{3}Z_s} \quad (2)$$

Y la corriente trifásica en las barras de la subestación A será

$$I_{ccA} = \frac{U}{\sqrt{3}(Z_s + Z_E)} \quad (3)$$

Analicemos ahora los métodos de selectividad

### Selectividad amperimétrica

En la selectividad amperimétrica, la magnitud a controlar es la corriente. En una red, una corriente de cortocircuito en una ubicación se va reduciendo conforme esta se encuentre más lejos de la fuente.

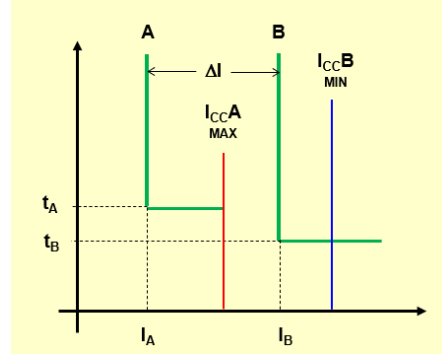


Figura 2. Selectividad amperimétrica. Las líneas verdes representan las curvas de disparo de los relés A y B respectivamente, la roja la corriente de cortocircuito en barras de la subestación A y la azul en barras de la subestación B

Teniendo en cuenta la Figura 2, y considerando el criterio propuesto por [1], para el ajuste de la corriente de arranque del relé (pick up)  $I_{PU}$ , tenemos (para el relé ubicado en la subestación B) que

$$\begin{aligned} I_{PU} &\leq 0.5 |I_{CC_{MIN}B}| \\ I_{PU} &\geq 1.25 |I_{CC_{MAX}A}| \end{aligned} \quad (4)$$

Podemos concluir que

$$\frac{|I_{CC_{MIN}B}|}{|I_{CC_{MAX}A}|} \geq 2.5 \quad (5)$$

La corriente  $I_{CC_{MIN}B}$ , se produce prácticamente en las fallas fase-fase, y considerando (2), obtenemos

$$I_{CC_{MIN}B} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{ccB} = \frac{U}{2Z_s} \quad (6)$$

La corriente máxima en A, sería la misma corriente trifásica, es decir, según (3)

$$I_{CC_{MAX}A} = \frac{U}{\sqrt{3}(Z_s + Z_E)} \quad (7)$$

De (5), (6) y (7) obtenemos

$$1 + \left| \frac{Z_E}{Z_s} \right| \geq 2.5 \cdot \frac{2}{\sqrt{3}}, \quad \left| \frac{Z_E}{Z_s} \right| \geq 1.9 \quad (8)$$

Podemos establecer entonces que la relación entre las impedancias entre las dos subestaciones ( $Z_E$ ) y la impedancia aguas arriba de la subestación más cercana a la fuente ( $Z_s$ ) debe ser mayor o igual a 2 para que se pueda aplicar selectividad amperimétrica. Si se cumple cualquiera de las dos condiciones (5) u (8), se puede aplicar la selectividad amperimétrica.

En las redes de media tensión dentro de un área, donde las distancias entre subestaciones son relativamente pequeñas (menores a un kilómetro), las condiciones (5) u (8) no se cumplirán, por lo tanto, no es posible aplicar selectividad amperimétrica

Para graficar esta conclusión, asumamos una red en 20 kV, que en el punto de suministro nos indican una potencia de cortocircuito de 300 MVA. Consideremos dos casos, uno en el cual la subestación A está conectada a través de un cable de longitud 0.6 Km y de 240 mm<sup>2</sup> de sección (Figura 3a) y otro caso en que la unión se hace mediante un transformador de 2 MVA, 20/0.4 kV,  $u_k = 6\%$  (Figura 3b).

Si expresamos estos datos en valores por unidad (pu) sobre una base de 100 MVA/20kV, tendremos  $U = 1.0$  pu,  $S_{cc} = 3.0$  pu. La impedancia base será  $Z_B = 20^2/100 = 4.0 \Omega$ , de donde podemos obtener que  $Z_S = 0.333$  pu. En el caso del cable su impedancia será aproximadamente  $Z_E = 0.036$  pu y en el caso del transformador  $Z_E = 3.0$  pu.

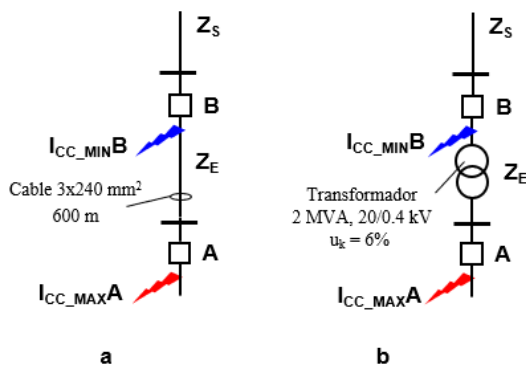


Figura 3. Dos subestaciones A y B en cascada. a). Unión entre subestaciones con cable. b). Unión mediante un transformador.

Así obtenemos, para el caso de la unión con cable (Figura 3a), aplicando (8), obtenemos  $Z_E/Z_S = 0.108$ . Para el caso de unión con transformador  $Z_E/Z_S = 9.009$ . En este último caso, podemos aplicar selectividad amperimétrica, pero en el primero no. Podemos recurrir en este caso a otro método de selectividad, la selectividad cronométrica.

#### Selectividad cronométrica

La selectividad cronométrica consiste en ajustar los tiempos de disparo de los relés escalonadamente. Cuanto más cerca estén de la fuente, mayor será la temporización. Si no es posible hacer una discriminación por corrientes, se consigue selectividad escalonando el tiempo de ajuste de disparo de los relés.

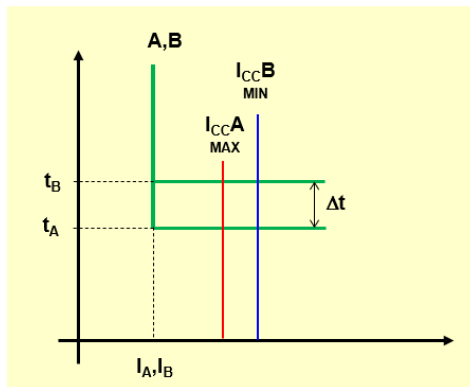


Figura 4. Selectividad cronométrica. Las líneas verdes representan las curvas de disparo de los relés A y B respectivamente, la roja la corriente de cortocircuito en barras de la subestación A y la azul en barras de la subestación B

En la Figura 4 se muestra el concepto de la selectividad cronométrica. Se debe tener en cuenta el intervalo  $\Delta t$ , que es el tiempo total de despeje de la falla más un margen de tolerancia. El tiempo total de despeje de falla es la suma del tiempo del relé y el tiempo de corte del interruptor (ver Figura 5). El tiempo de relé se considera desde el instante de la falla hasta la energización del circuito de disparo (detección, procesamiento y cierre del contacto de salida) y el tiempo de corte del interruptor se considera desde el cierre del circuito de disparo hasta la extinción final del arco (tiempo de apertura, tiempo de arco) [5],[6].

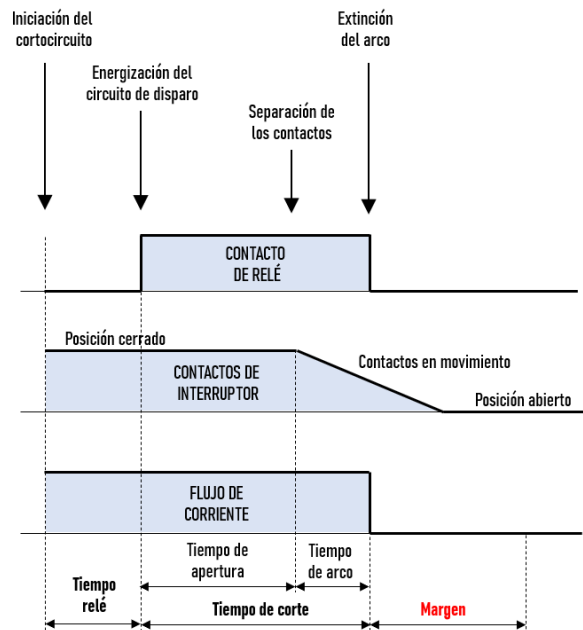


Figura 5. Tiempos que intervienen desde la iniciación de un cortocircuito hasta la extinción del arco, cuando el flujo de corriente es cero, donde se aprecian todos los tiempos involucrados, además de un margen de seguridad.

Según [3], considera tiempos de relé (numéricos) de 33 ms y el tiempo de corte del interruptor (break time) de 67 ms. Según manuales de fabricantes el tiempo de los relés está entre 1 o 2 ciclos (16.7 – 33.3 ms) y el tiempo de corte de interruptores de media tensión entre 50 o 60 ms. Tomaremos los tiempos dados por en [3], que son más conservadores. El tiempo total de despeje será de 100 ms, más un margen de seguridad de 100 ms, podemos considerar el intervalo  $\Delta t = 200$  ms. Esto es, que el escalonamiento de tiempo entre relés aguas arriba será, si el mínimo se establece como 20 ms, 220, 420, 620 ms, para 2, 3 y 4 niveles aguas arriba de la falla más alejada de la fuente. Se puede ver entonces, que el tiempo de disparo de la protección de la empresa de servicios tendría que estar al menos a 820 ms, lo cual compromete su coordinación a niveles aguas arriba.

Por lo tanto, las corrientes de cortocircuito en barras de varias subestaciones en una red de media tensión, al ser muy cercanas, como hemos visto, no se podría aplicar selectividad amperimétrica ni cronométrica. Para dar solución a esto, recurrimos a las opciones de comunicación que brindan los modernos relés numéricos facilidades, que nos permiten otro método de selectividad: la selectividad lógica

### III SELECTIVIDAD LÓGICA Y PROTECCIÓN ADAPTATIVA

Hemos visto que los métodos tradicionales de selectividad que se basan en el escalonamiento de corriente y tiempo de operación de los relés, en el caso de sistemas de distribución en media tensión con sus subestaciones relativamente cerca, no es posible. El desarrollo de relés que se comunican entre sí, permite realizar una *selectividad lógica*, también llamada *selectividad de zona*.

La selectividad lógica (o selectividad de zona) se basa en la interconexión y el intercambio directo de mensajes entre las protecciones ubicadas en la red para identificar y aislar únicamente el segmento afectado por la falla [2]. En particular, se instala un número definido de interruptores automáticos (Q) en la red de media tensión; cada Q está controlado por un relé de protección (R) que se comunica con los demás R (ver Figura 6). Según la selectividad lógica, cada R que detecta la falla envía una señal de bloqueo, a la protección aguas arriba, inhibiendo su intervención [2].

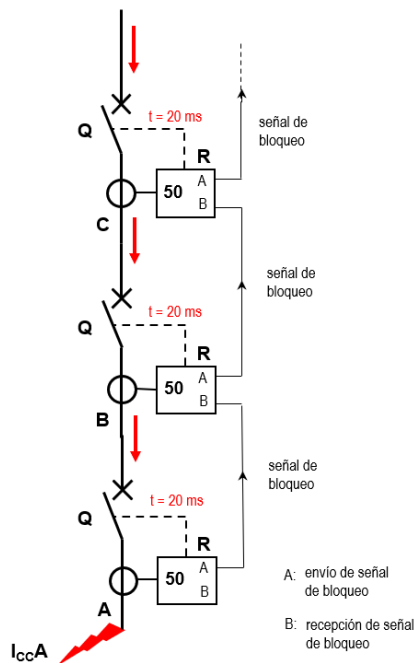


Figura 6. Selectividad lógica. En cada una de las subestaciones A, B y C, se ubica un interruptor automático Q que recibirá la orden de abrir de su relé de protección R asociado al detectar una corriente de cortocircuito, siempre y cuando no haya recibido una señal de bloqueo del relé aguas abajo.

En la Figura 6 se indica una falla en la subestación A, todos los relés aguas arriba “verán la falla” y cada uno de ellos envía una señal de bloqueo al relé aguas arriba. En este caso el único relé que no recibe señal de bloqueo es el de la subestación A que dará la orden de abrir su interruptor en 20 ms. Siempre el relé que está inmediatamente aguas arriba de la falla, no recibirá orden de bloqueo y por lo tanto actuará en los 20 ms ajustados en cada relé.

Si por operatividad de la red se producen cambios en la topología de la red, intermedio a la señal de bloqueo se puede tener una condición lógica que será función de la configuración adoptada que se debe cumplir antes de producir el bloqueo. Este cambio de topología de la red, puede ocasionar que varíen los valores de las corrientes de cortocircuito o las corrientes de

carga que requieran que se configuren también los ajustes de los relés en las subestaciones; es decir, aplicar el concepto de *protección adaptativa*. Algunos de los modernos relés digitales (numéricos), tienen dos o más grupos de ajuste, de tal modo que se pueden configurar los ajustes de acuerdo a los cálculos previos para cada configuración que presentará.

En el presente artículo solo se analizan redes radiales, con único suministro de la empresa de servicio. Por lo tanto, no se producirán cambios de dirección del flujo de la corriente de cortocircuito. Los cambios solo se deberán a la reconfiguración de la red. En este caso se puede aplicar dos enfoques de la protección adaptativa [7], uno es calcular en función de contingencias de la red predefinidas y almacenar como grupos de ajuste o se puede hacer uso de un algoritmo totalmente adaptativo que calcula nuevos ajustes en función de la nueva configuración de la red. En ambos casos se requiere comunicación entre relés.

El estudio de caso tratado en este artículo utilizará el enfoque de grupos de ajuste.

### IV ESTUDIO DE CASO: RED DE MEDIA TENSIÓN HOSPITALARIA

#### Descripción del Sistema

La red en estudio es de 20 kV, alimentada por la empresa de servicios (ESE) en un solo punto, llega a una subestación principal (SEP) de la cual se derivan 3 subestaciones denominadas SE1, SE2 y SE3 con posibilidad de enlaces entre SE1-SE2 y SE2-SE3. De cada una de las cuales se derivan a su vez tres salidas con transformadores de 2000 kVA, 20/0.4 kV, como se puede apreciar en la Figura 7.

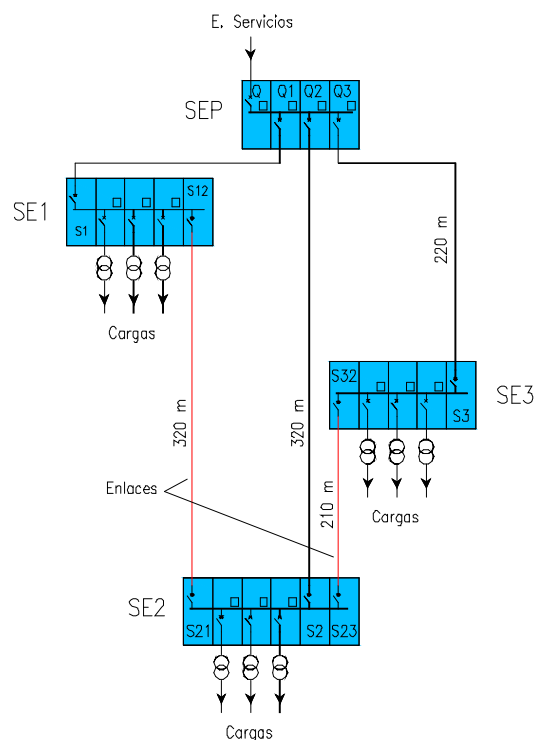
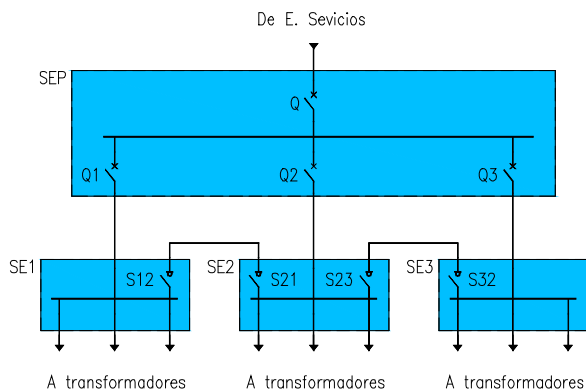


Figura 7. Representación esquemática simplificada de la red de 20 kV. Se indican las longitudes de los cables entre la SEP y las SEs, así como las longitudes de enlace entre SEs.

En la **Figura 7**, los cuadrados pequeños mostrados en algunas celdas, representan los relés de protección R instalados.

Con la finalidad de analizar las configuraciones posibles, por el cambio de estado de algunos de sus dispositivos de maniobra (Interruptor automático Q y seccionador S) la red mostrada en la **Figura 7**, se puede representar como un sistema de tres barras con acoplamiento entre ellas, tal como se puede apreciar en el diagrama unifilar mostrado en la **Figura 8**, donde solo se ha representado la red de 20 KV, ya que el estudio de coordinación de protección (ECP) se limita a la media tensión. En este diagrama, además, solo se muestran los dispositivos de maniobra que intervendrán en el cambio de la topología de la red.



**Figura 8.** Diagrama unifilar simplificado de la red de 20 KV. En este diagrama solo se muestran los dispositivos de maniobra que pueden cambiar la topología de la red.

#### Configuraciones posibles del sistema

El funcionamiento normal de la red es con los interruptores Q1, Q2 y Q3 cerrados, alimentando cada uno su SE respectiva y con todos los seccionadores abiertos. Ante la eventualidad de que una SE no reciba directamente tensión de su alimentador normal, se puede alimentar de las barras de una SE adyacente, cerrando los seccionadores correspondientes. En ningún caso se debe producir una alimentación paralela, esto es, no se formará un anillo, se seguirá manteniendo una red radial.

Las configuraciones posibles se muestran en la **Tabla 1**

**Tabla 1.** Configuraciones de operación del sistema

Configuración		Interruptores			Seccionadores			
		Q1	Q2	Q3	S12	S21	S23	S32
Normal	C1	1	1	1	0	0	0	0
	C2	0	1	1	1	1	0	0
	C3	1	0	1	1	1	0	0
Falla de un alimentador	C4	1	0	1	0	0	1	1
	C5	1	1	0	0	0	1	1
Falla de dos alimentadores	C6	0	0	1	1	1	1	1
	C7	0	1	0	1	1	1	1
	C8	1	0	0	1	1	1	1

0 dispositivo de maniobra abierto

1 dispositivo de maniobra cerrado

Para realizar el ECP, se requiere hacer primero un estudio de flujo carga y un cálculo de las corrientes de cortocircuito para los diferentes tipos que se pueden presentar (trifásico, fase-fase,

doble fase-tierra y fase-tierra considerando resistencia de arco y de tierra, para cada una de las 8 configuraciones

#### Flujos de carga:

Con el estudio de flujo de carga se analiza el comportamiento de la red en condiciones normales de estado estacionario, garantizando una operación segura, eficiente y confiable. Entre sus objetivos está, determinar las tensiones en barras y las corrientes de carga de cables, transformadores tal que no excedan de sus valores nominales de operación.

Para nuestro de estudio de caso, se ha realizado el estudio de flujo de carga con ayuda del software ETAP 20.0.0 para cada una de las configuraciones posibles. La potencia contratada considerada es de 7,500 kW de carga total distribuidos igualmente entre los 9 transformadores del sistema. En la **Tabla 2** se muestra el resumen de los cálculos de las corrientes de carga para cada configuración

**Tabla 2.** Resultado de las corrientes de carga para cada configuración (A)

De A	ES SEP	SEP			SE <sub>1</sub> T <sub>1,2,3</sub>	SE <sub>2</sub> SE2	SE <sub>3</sub> SE3
		SE	SE2	SE3			
C1		83.1	83.1	83.1		0.0	0.0
C2		0.0	166.2	83.1		83.1	0.0
C3		166.2	0.0	83.1		83.1	0.0
C4	249.3	83.1	0.0	166.2	27.7	0.0	83.1
C5		83.1	166.2	0.0		0.0	83.1
C6		0.0	0.0	249.3		83.1	166.2
C7		0.0	249.3	0.0		83.1	83.1
C8		249.3	0.0	0.0		166.2	83.1

Si analizamos la **Tabla 2**, vemos que por los cables derivados de la SEP a cada SE, las corrientes que pasan son de 83.1 A en situación normal (C1) y en caso de falla de un alimentador son de 166.2 A (C2-C5). En caso de falla de las dos fuentes, la corriente que pasa será la total de la instalación, 249.3 A (C6-C8). Esto lo tendremos en cuenta para la protección adaptativa.

#### Corrientes de cortocircuito

Se han calculado las corrientes de cortocircuito máximas y mínimas para los diferentes tipos de falla y configuraciones posibles. Estas corrientes se utilizan para la coordinación, ajustando las curvas corrientes-tiempo de cada relé y lograr una adecuada protección y selectividad. Los cálculos se han realizado con el software ETAP 20.0.0. Los datos de los cables y transformadores se dan en la **Tabla 3** y **4** respectivamente. La potencia de cortocircuito dada por ESE es de 280 MVA max, 110 MVA min, y el tiempo máximo de disparo de su relé 200 ms.

Para un mejor análisis el sistema se ha dividido en los siguientes niveles de protección

#### Cortocircuito en barras de:

Nivel 0	Salida de SE ESE
Nivel 1	Acometida
Nivel 2	SEP
Nivel 3	SEs (1,2,3)
Nivel 4	entrada transformadores
Nivel 5	salida transformadores

#### Relé aguas arriba más cercano

Relé RESE
Relé RESE
Relé R
Relés R1P, R2P y R3P
Relés R1, ..., R9
Relés R1, ..., R9

Tabla 3. Datos de los cables

De	ES	SEP			SE <sub>n</sub>	SE	SE2
A	SEP	SE	SE2	SE3	T <sub>1n</sub> 2 <sub>n</sub> 3 <sub>n</sub>	SE2	SE3
L(m)	220	10	320	220	10	320	210
n	2	2	2	2	1	1	1

Tipo : N2XSOH  
 Tensión : 18/30 kV  
 Sección : 1x240 mm<sup>2</sup>  
 Resistencia : 0.0975 Ω/km a 90°C (disposición plana)  
 Reactancia inductiva : 0.1979 Ω/km a 60 Hz  
 Capacidad : 470 A enterrado

Tabla 4. Datos de los transformadores

Descripción	Valor
Tipo	: seco, encapsulado
Potencia	: 2000 kVA
Impedancia de cortocircuito	: 6 %
Conexión	: Delta-estrella
Relación de transformación	: 20/0.4 kV
Puesta a tierra del neutro	: sólidamente
Relación X/R	: 6
Constante de tiempo de inserción	: 470 A enterrado

En la [Figura 9](#) se muestra un panorama general con los dispositivos de maniobra, sus relés correspondientes y los niveles de cortocircuito indicados arriba.

En las [Tabla 5](#) se muestra un resumen de los valores de corrientes de cortocircuito entre fases y fase a tierra, máximas y mínimas por niveles, como resultado de los cálculos realizados con el programa ETAP para todas las configuraciones posibles.

Tabla 5. Corrientes de cortocircuito (A) reflejadas al lado de 20 kV por Niveles

Tipo de corriente de cortocircuito		Nivel de cortocircuito					
		0	1	2	3	4	5
Fases	Mínima	7,000	6,892	6,892	6,321	6,313	808
	Máxima	8,083	7,969	7,969	7,969	7,959	922
Fase-tierra	Mínima	421	421	421	421	421	420
	Máxima	3,175	3,154	3,154	3,154	3,152	555

Se puede observar que en toda la red de media tensión (niveles 0 a 4) las corrientes máximas de un determinado nivel, son mayores que las corrientes mínimas del nivel aguas arriba. Esto imposibilita aplicar selectividad amperimétrica. Solo es posible aplicar selectividad amperimétrica entre los niveles 4 y 5, donde se cumple la condición (5). Si aplicamos selectividad cronométrica, hasta el nivel 1 se requerirá un tiempo de 620 ms, que supera el tiempo máximo de 200 ms dado por la ESE, resulta también inaplicable la selectividad cronométrica.

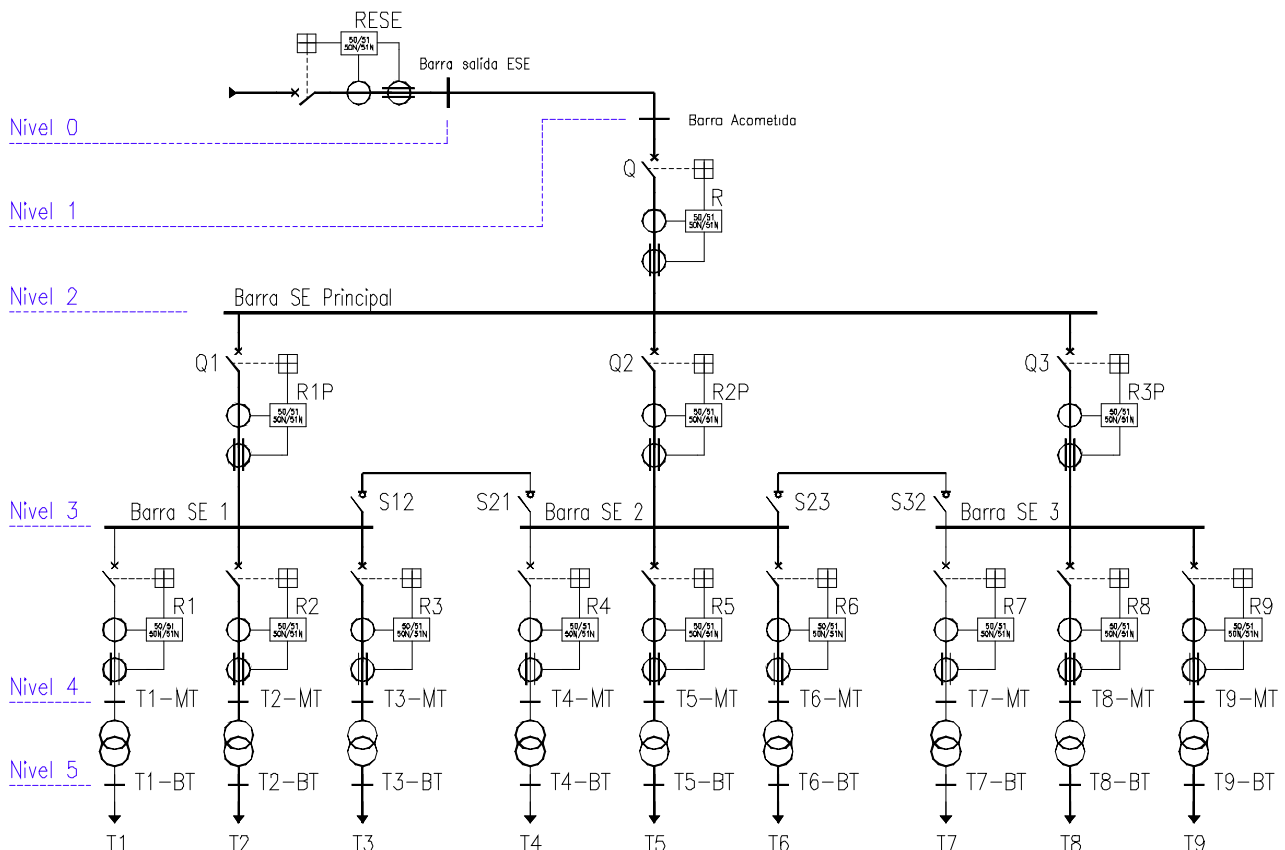


Figura 9. Diagrama unifilar, que muestra todos los elementos de maniobra principales (Q... y S...), con sus relés de protección asociados (R...), los transformadores de corriente de fase y homopolares, los transformadores y las barras con su nivel de cortocircuito asignado.

### Aplicación de selectividad lógica y protección adaptativa.

Debido a que se tienen 8 diferentes configuraciones, las ordenes de bloqueo que darán los relés aguas abajo que detecten una corriente de falla y arranquen su unidad de sobrecorriente, la señal de bloqueo que envíen no siempre será al mismo relé aguas arriba de él, sino que variará según la configuración.

En la Figura 10, se muestra un diagrama donde se muestran las señales (contactos auxiliares) que los equipos de maniobra tienen que enviar al PLC (Controlador Lógico Programable) para indicar su estado (cerrado o abierto) y autorizar el bloqueo correspondiente, una vez que algún relé de la orden.

La lógica requerida para bloquear el disparo de los relés R1P, R2P y R3P se muestran en los diagramas lógicos de las Figuras 11, 12 y 13 respectivamente. El bloqueo de la unidad instantánea del relé R se dará ante la orden de cualquiera de los relés R1P, R2P o R3P que detecte una falla y no requeriría pasar por el PLC, ya que la lógica es muy simple.

Las señales de los seccionadores e interruptores que interviene en los esquemas lógicos se deben llevar a un dispositivo inteligente, así como las señales de arranque de los relés. El tiempo desde la emisión de la orden de bloqueo hasta la recepción, no debe ser mayor de la mitad que se considere para el tiempo de disparo de la unidad instantánea (se está considerando 20 ms). Las señales de estado de los equipos de maniobra, solo definen la configuración del sistema y no requieren la velocidad que las señales para el bloqueo. Se pueden llevar mediante las RTU (Unidad de Telemetría Remota) instaladas para la implementación de un sistema SCADA (control de supervisión y adquisición de datos)

Esta propuesta permitirá que los tiempos de disparo instantáneo se reduzcan a tiempos muy cortos (20 ms) en cualquiera de los niveles de MT y que la selectividad dentro de la red quede asegurada

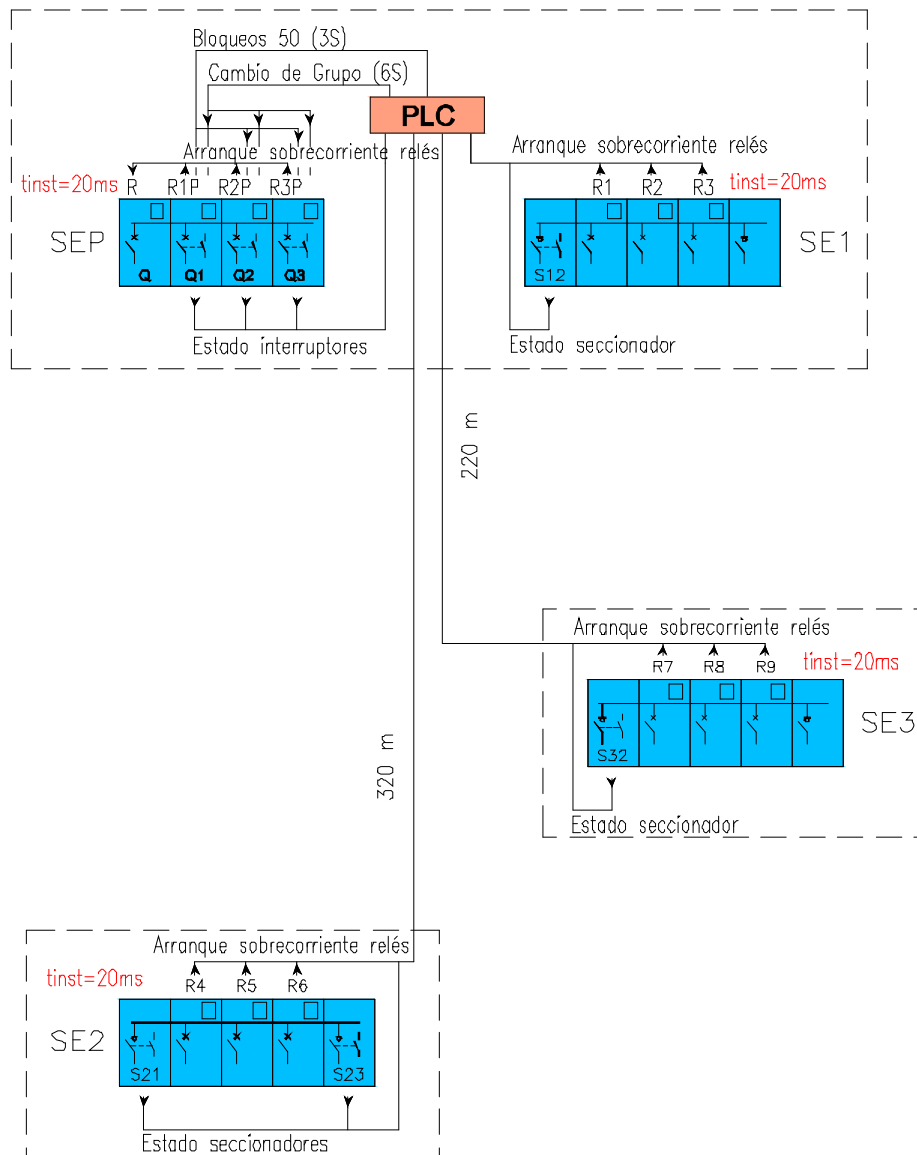


Figura 10. Esquema general de protección donde se indican los dispositivos de maniobra con sus contactos auxiliares para implementar la lógica de bloqueo para la selectividad lógica y la protección adaptativa, así como los contactos de los relés para las órdenes de bloqueo.

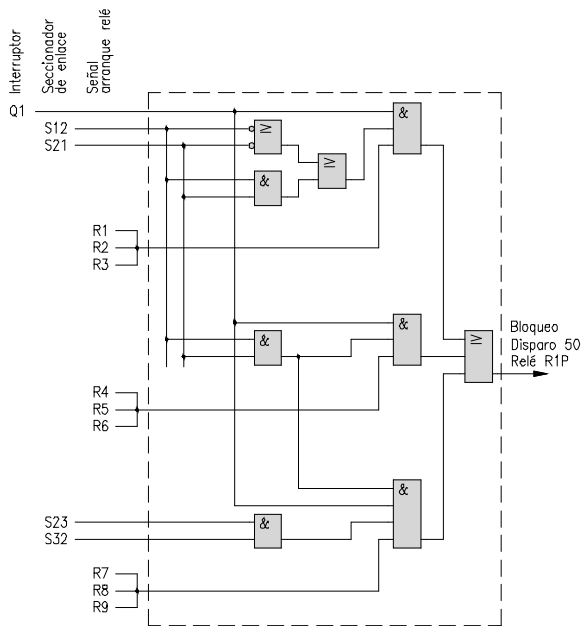


Figura 11. Esquema lógico para bloqueo de disparo instantáneo de relé R1P, para implementar en PLC

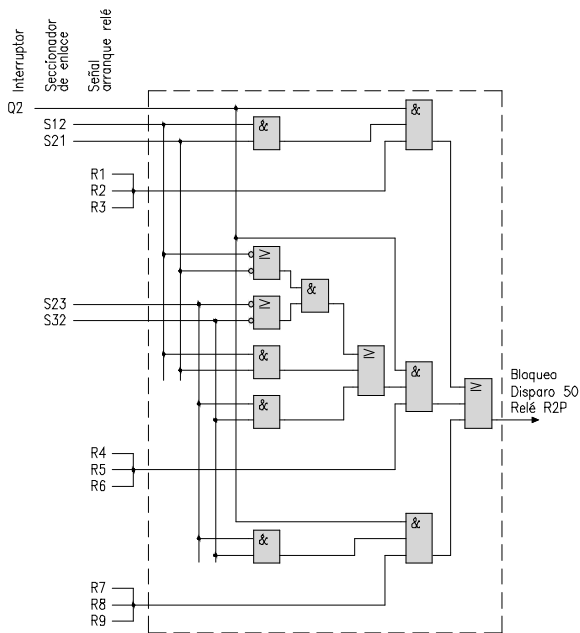


Figura 12. Esquema lógico para bloqueo de disparo instantáneo de relé R2P, para implementar en PLC

En la [Tabla 2](#), vimos que las corrientes en los alimentadores que van desde la SEP hasta las SE1, SE2 y SE3 varían de acuerdo a la configuración adoptada. Si proyectamos estos resultados a la corriente de plena carga de los transformadores, esto es, 57.7 A en 20kV, en la configuración normal (C1), la corriente en cada alimentados será 173.1 A (3 transformadores), y, por lo tanto, para los ajustes de los relés R1P, R2P y R3P se tomará como base esta corriente. Este ajuste se puede hacer eligiendo una curva tiempo-corriente (función 51), de tal forma que actúen como respaldo a los relés que protegen cada transformador (Relés R1, ..., R9) ante un cortocircuito en bornes

de baja tensión, que solo “verán” los relés instalados en media tensión, ya que se produce aguas arriba de la protección del interruptor general de baja tensión.

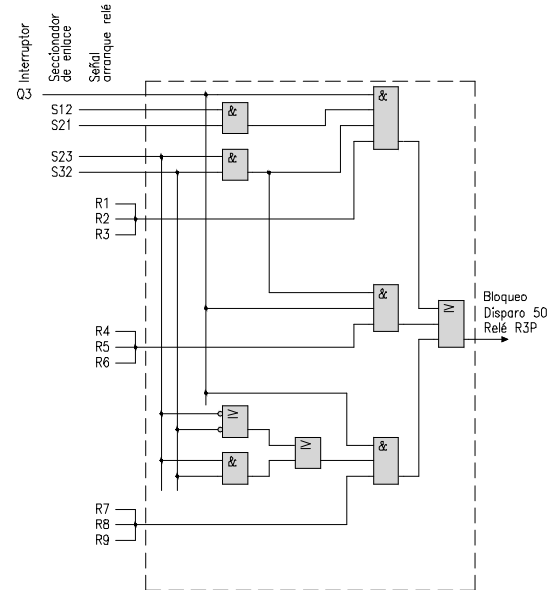


Figura 13. Esquema lógico para bloqueo de disparo instantáneo de relé R3P, para implementar en PLC

En una configuración de contingencia (C2 a C8) la corriente de base de ajuste de los relés R1P, R2P y R3P tendría que ser mayor, de 346.2 A para un alimentador deshabilitado y de 519.3 A para dos alimentadores deshabilitados. En este caso ya no será posible ajustar una curva de tiempo inverso, por lo tanto, en estas configuraciones se tiene que cambiar el ajuste de los relés R1P, R2P y R3P. Es en estos relés donde se aplicará el concepto de *protección adaptativa*. La lógica requerida para el cambio de grupo de ajuste en estos relés se muestra en el diagrama lógico de la [Figura 14](#).

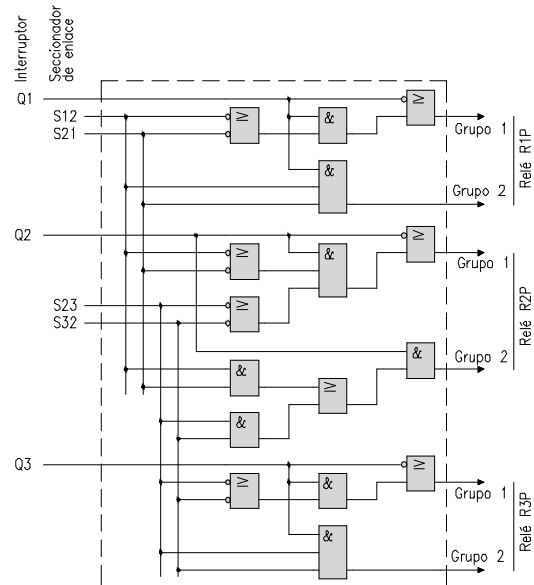


Figura 14. Esquema lógico para selección de grupos de ajuste en los relés R1P, R2P y R3P, para implementar en PLC

## Curvas de coordinación y ajustes de relés

En las Figuras 15 y 16 se muestran las curvas tiempo-corriente resultantes de los valores de ajuste de los relés para brindar protección de equipos y cables y garantizar selectividad en la instalación. Se puede apreciar los dos grupos de ajuste para el relé R1P (serán similares para R2P y R3P). Obtenido del programa ETAP

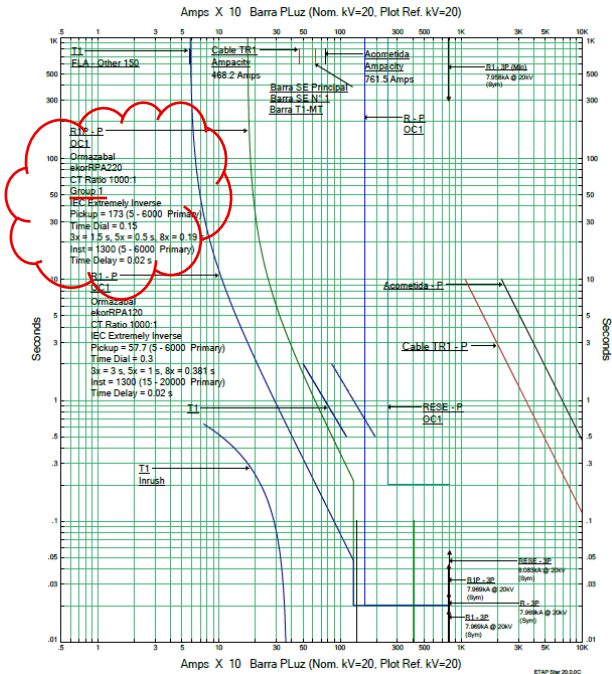


Figura 15. Curvas tiempo-corriente de los relés de protección, para la configuración C1. Se aprecia que se está utilizando el Grupo 1 de ajuste para el relé R1P (encerrado en una nube).

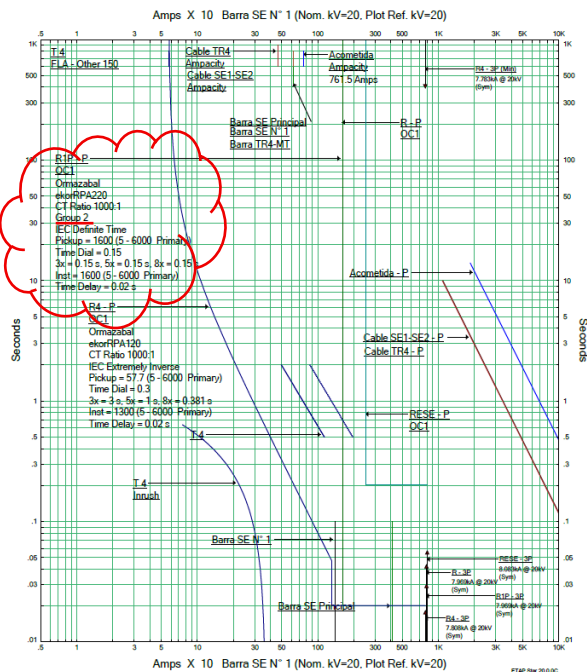


Figura 16. Curvas tiempo-corriente de los relés de protección, para las configuraciones C2 a C8. Se aprecia que se está utilizando el Grupo 2 de ajuste para el relé R1P (encerrado en una nube).

## V FUTURAS EXTENSIONES

Esta aplicación se puede utilizar para otros casos donde se pueda selectividad lógica. Normalmente, las empresas de servicios eléctricos entregan un punto de suministro en media tensión con un umbral de tiempo no mayor a 300 ms, esto dificulta implementar una selectividad efectiva, si dentro de la instalación del usuario hay más de una subestación en cascada. Se debe ahondar en la aplicación de la selectividad de largo Alcance (LoRa) para la protección de redes de media tensión.

## VI CONCLUSIONES

La selectividad lógica, gracias a la capacidad de comunicación de los relés digitales numéricos, actualmente es aplicable en las instalaciones de media tensión, donde no hay diferencia práctica en las corrientes de cortocircuito producidas en las barras de las subestaciones (a relativamente poca distancia entre ellas). De este modo se logra una selectividad perfecta.

La protección adaptativa, en su enfoque de grupos de ajuste ha permitido mejorar la protección en la operación normal del sistema, introduciendo una protección de respaldo para cortocircuitos en el lado de baja tensión de los transformadores.

## REFERENCIAS

- [1] Anderson, Paul M. Power System Protection – IEEE PRESS Wiley - Second Edition 2022.
- [2] Angrisani, Leopoldo; Bonavolonta, Francesco; Liccardo, Annalisa, and Schiano Lo Moriello, Rosario. *On the Use of LoRa Technology for Logic Selectivity in MV Distribution Networks* – energies 8 November 2018
- [3] Criterios de ajuste y coordinación de los sistemas de protección del SEIN (Comisión de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional) – Julio de 2022
- [4] Das, J.C. Power System Handbook – Volume 4: Power System Protective Relaying – CRC Press Taylor & Francis Group Boca Raton London New York – Edition 2018
- [5] IEC 62271-100 High-voltage switchgear and controlgear – Part 100: High-voltage alternating-current circuit breaker
- [6] Rao, Sunil S. Switchgear Protection and Power Systems – Khanna Publishers Nai Sarak, Delhi 110002 – Edition 2010
- [7] Slabbert, Martin J.; Naidoo, Raj; Bansal, Ramesh C. - Adaptive Protection Setting for Medium Voltage Feeders – SAIEE SMART GRID CONFERENCE FEB 2016

## *El Comité Editorial*

*Dr. JORGE M SEMINARIO  
Ing. SAUL RODRIGUEZ ASTUCURI  
Ing. RUBEN GOMEZ SANCHEZ  
Ing. ENRIQUE SALAZAR JARAMILLO  
Ing. ROSA DELGADO VASQUEZ*

23 JULIO 2026

