

Analysis of the future Chilean hydrogen-electricity supply chain under the effects of various energy policies

Javier Jorquera Copier¹ Álvaro Lorca^{1,2} Enzo E. Sauma² Matías Negrete-Pincetic¹

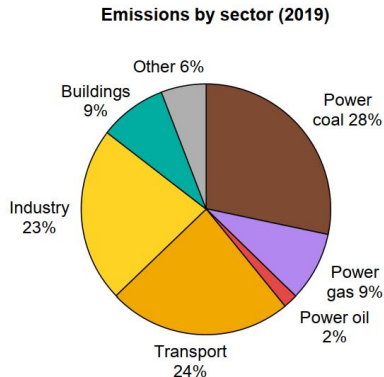
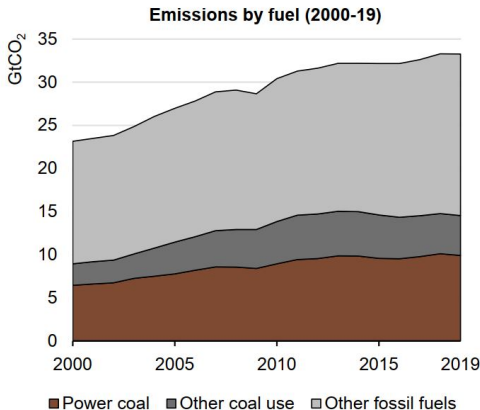
¹Departamento de Ingeniería Eléctrica

²Departamento de Ingeniería Industrial y de Sistemas
Pontificia Universidad Católica de Chile

jnjorquera@uc.cl

13° Encuentro Anual - Sociedad Chilena de Políticas Públicas
Santiago, Chile
12 de enero de 2022

Hay una cantidad considerable de emisiones más allá del sector eléctrico y el hidrógeno puede aportar en su reducción



Energy Technology Perspectives (International Energy Agency, 2020)

Marco de análisis

Planificación de sistemas energéticos

- ▶ Gacitúa et al. (2018): comúnmente se usan modelos de optimización para hacer *policy analysis* y planificar sistemas energéticos.

Integración sistemas H_2 -electricidad

- ▶ Stöckl et al. (2021) y He et al (2021): múltiples beneficios por diseñar y operar conjuntamente estos sistemas.

PELP (Ministerio de Energía de Chile)

- ▶ Planificación de LP del sistema eléctrico. Incluye H_2 como fuente de demanda eléctrica, sin modelar su cadena de suministro.

Oportunidad

- ▶ Modelo + caso de estudio H_2 -electricidad adecuado al caso chileno.

Contribuciones

Contribuciones del trabajo

- ▶ Desarrollo de modelo de optimización para la expansión de infraestructura H_2 -electricidad a gran escala y largo plazo.
- ▶ Se representa producción, almacenamiento y flujos de H_2 y electricidad, e incluye diverso mix de tecnologías, sujeto a restricciones operativas y de política.
- ▶ Caso de estudio construye sobre herramienta ya utilizada para planificación y análisis de políticas energéticas (PELP).
- ▶ Resultados muestran las decisiones de inversión/operación más costo-eficientes y muestran sinergias entre H_2 y electricidad.
- ▶ Análisis de las *policy implications* que se pueden derivar del estudio, en términos del portafolio más costo-eficiente y la conveniencia de implementar distintos grados de impuesto CO_2 y límites de emisiones.

Modelo matemático

Decisiones espaciotemporales de inversión y operación

Inversión en infraestructura, decisiones de **producción**, **flujos energéticos** y **almacenamiento**, entre otras **variables operacionales**, para suplir la demanda eléctrica y de hidrógeno minimizando costos asociados a inversión, operación y emisiones. Toda decisión es **centralizada** (no se simulan agentes económicos).

$$\min \quad \text{VPN} \left(\sum \text{Costos inversión} + \text{Costos operación} + \text{Pagos impuesto CO}_2 \right)$$

s.a. Balances de energía

Límites de producción de energía

Límites de flujo de energía

Restricciones de almacenamiento

Restricciones de inversión y disponibilidad de infraestructura

Reservas

Restricción de emisiones de CO₂

Fuentes de datos: hidrógeno y electricidad

Ítem	Fuente(s)
Electrolizadores	IEA (2019), Agora Energiewende and AFRY Management Consulting (2021)
Tuberías de H_2	
Trailers de H_2 comprimido	Wang et al. (2020)
Tanques de H_2	Yang et al. (2020)
Turbinas a gas hidrógeno	Bødal et al. (2020)
Sistema Eléctrico Nacional	Welder et al. (2019)
	Escenario E PELP 2020 (Ministerio de Energía, 2020)

Supuestos adicionales:

- ▶ Perfil horario demanda H_2 constante (Bødal et al., 2020)
- ▶ Reducción de 20% en disponibilidad hídrica 2050 vs 2020 (Lorca et al., 2020)
- ▶ Pronóstico demanda H_2 incluye 3 usos finales domésticos (sin exportación)
- ▶ Sin flujo de energía desde y hacia el sur de la Región de Los Lagos

Escenarios utilizados

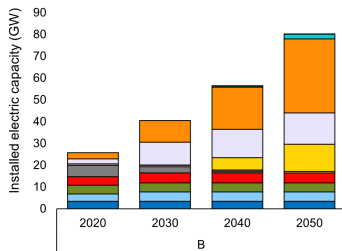
Escenario	Carbon tax (USD/tCO ₂)	Zero-emissions mandate	Demanda H ₂ exógena
<i>Baseline (B)</i>	5	No	Sí
<i>Baseline w/higher tax (BHT)</i>	5 (2020), 90 (2030), 200 (2050)	No	Sí
<i>Zero-emissions by 2050 (ZE2050)</i>	5	2050	Sí
<i>Zero-emissions by 2030 (ZE2030)</i>	5	2030	Sí
<i>EndogenousH₂ (ENH₂ZE2030)</i>	5	2030	No

Nota: para el escenario BHT se asume un crecimiento lineal del *carbon tax* en los años intermedios a los valores reportados en la tabla.

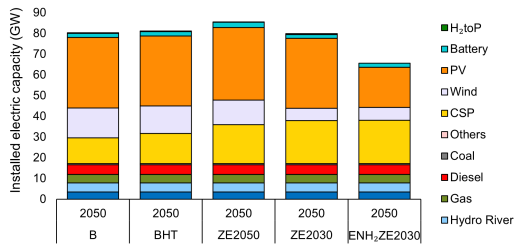
Capacidad eléctrica instalada

Solar FV, CSP y eólica juegan roles clave en la red eléctrica del futuro, mientras que H_2 toP no aparecería significativamente sin almacenamiento estacional de H_2

Evolución (caso base)



Comparativo (2050)



Costos y emisiones

Las políticas analizadas afectan significativamente las emisiones y costos acumulados en el periodo

Comparativa de costos totales y emisiones por escenario

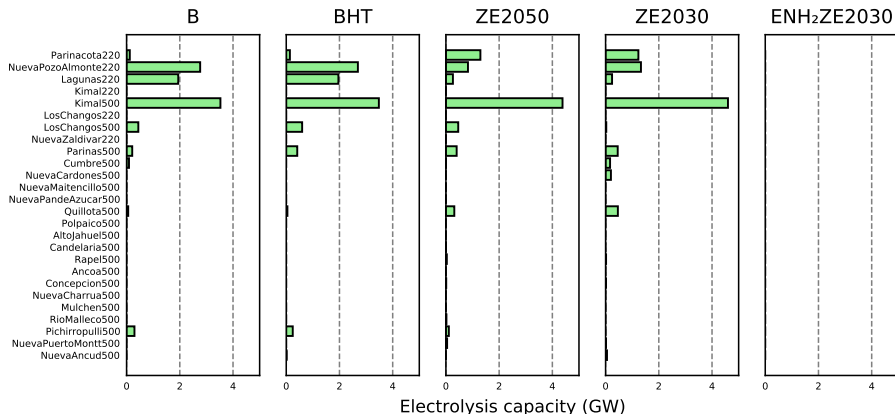
Ítem/escenario	B	BHT	ZE2050	ZE2030	ENH ₂ ZE2030
VPN (BUSD)	49.4	52.8	50.5	57.4	52.9
Emisiones anuales en 2050 (MtCO ₂ eq)	2.2	0.9	0.0	0.0	0.0
Emisiones acumuladas en 2050 (MtCO ₂ eq)	326.5	203.7	313.7	171.1	171.1
Costo marginal de abatimiento (BUSD/MtCO ₂ eq)		0.03	0.09	0.05	

Nota: el costo marginal de abatimiento es un indicador marginal de los costos adicionales incurridos para abatir más emisiones, respecto al escenario base (B). El escenario ENH₂ZE2030 fue omitido de este cálculo por no ser comparable debido a la ausencia de demanda de hidrógeno, lo que implica una menor demanda energética total que los otros 4 escenarios.

Capacidad de electrólisis

Producir hidrógeno casi exclusivamente en el norte sería lo más costo-eficiente en todos los escenarios con demanda de hidrógeno

Comparativa de capacidad instalada de electrólisis en 2050 según escenario



Conclusiones

- ▶ Se desarrolló caso de estudio de la evolución más costo efectiva del sistema integrado de hidrógeno-electricidad para Chile bajo efecto de políticas energéticas (2020-2050)
- ▶ Bajo supuestos tomados, sistema se acercaría a cero emisiones en 2050 sin políticas adicionales, con rol clave de solar FV, CSP y eólica
- ▶ Políticas como impuesto CO_2 y límite de emisiones pueden tener impacto significativo en costos sistémicos, emisiones acumuladas y mix de tecnologías
- ▶ Lo más costo-eficiente sería producir casi todo el hidrógeno en el norte y luego transportarlo a los consumos
- ▶ Generación de electricidad con H_2 no haría sentido económico si solo se considera almacenamiento de corto plazo

Policy implications y trabajo futuro

Policy implications

- ▶ Políticas adicionales se pueden requerir para llegar a cero emisiones en 2050 desde el caso base (impuestos, límites, subsidios)
- ▶ Políticas climáticas y el riesgo de alza de tarifa de usuarios finales
- ▶ Infraestructura y regulación para producción a gran escala de H_2 en zona norte
- ▶ Nuevos esquemas regulatorios para mercados de bajo (o nulo) CMg

Trabajo futuro

- ▶ Rol de almacenamiento estacional de H_2
- ▶ Efecto de exportación a gran escala de H_2
- ▶ Modelamiento de agentes económicos

Analysis of the future Chilean hydrogen-electricity supply chain under the effects of various energy policies

Javier Jorquera Copier¹ Álvaro Lorca^{1,2} Enzo E. Sauma² Matías Negrete-Pincetic¹

¹Departamento de Ingeniería Eléctrica

²Departamento de Ingeniería Industrial y de Sistemas
Pontificia Universidad Católica de Chile

jnjorquera@uc.cl

13° Encuentro Anual - Sociedad Chilena de Políticas Públicas
Santiago, Chile
12 de enero de 2022

- Agora Energiewende and AFRY Management Consulting. (2021). *No-regret hydrogen: Charting early steps for H₂ infrastructure in Europe*. <https://www.agora-energiewende.de/en/publications/no-regret-hydrogen/>
- Barroso, L., Muñoz, F. D., Bezerra, B., Rudnick, H., & Cunha, G. (2021). Zero-Marginal-Cost Electricity Market Designs: Lessons Learned From Hydro Systems in Latin America Might Be Applicable for Decarbonization. *IEEE Power and Energy Magazine*, 19(1), 64–73. <https://doi.org/10.1109/mpe.2020.3033398>
- Bødal, E. F., Mallapragada, D., Botterud, A., & Korpås, M. (2020). Decarbonization synergies from joint planning of electricity and hydrogen production: A Texas case study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(58), 32899–32915. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.127>
- Gacitúa, L., Gallegos, P., Henriquez-Auba, R., Lorca, Á., Negrete-Pincetic, M., Olivares, D., Valenzuela, A., & Wenzel, G. (2018). A comprehensive review on expansion planning: Models and tools for energy policy analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 98, 346–360. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.043>
- GIZ, & HINICIO Chile. (2021). *Cuantificación del encadenamiento laboral para el desarrollo del hidrógeno en Chile bajo un escenario de exportación [Quantification of the labor linkage for hydrogen development in Chile under an export scenario]*. <https://www.4echile.cl/publicaciones/cuantificacion-del-encadenamiento-laboral-para-el-desarrollo-del-hidrogeno-en-chile-bajo-un-escenario-de-exportacion/>
- He, G., Mallapragada, D. S., Bose, A., Heuberger-Austin, C. F., & Gençer, E. (2021a). Sector coupling via hydrogen to lower the cost of energy system decarbonization. *Energy Environmental Science*, 14(9), 4635–4646. <https://doi.org/10.1039/d1ee00627d>
- He, G., Mallapragada, D. S., Bose, A., Heuberger-Austin, C. F., & Gençer, E. (2021b). Sector coupling via hydrogen to lower the cost of energy system decarbonization. *Energy Environmental Science*, 14(9), 4635–4646. <https://doi.org/10.1039/d1ee00627d>
- International Energy Agency. (2019). *The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities*. IEA Publications. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

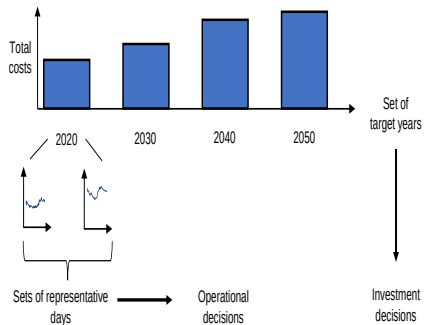
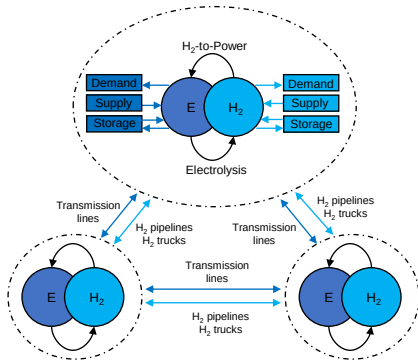
- International Energy Agency. (2020). *Energy Technology Perspectives 2020*. IEA Publications. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>
- International Energy Agency. (2021a). *Achieving Net Zero Electricity Sectors in G7 Members*. IEA Publications. <https://www.iea.org/reports/achieving-net-zero-electricity-sectors-in-g7-members>
- International Energy Agency. (2021b). *Global Hydrogen Review 2021*. IEA Publications. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>
- International Energy Agency. (2021c). *Hydrogen in Latin America: From near-term opportunities to large-scale deployment*. IEA Publications. <https://www.iea.org/reports/hydrogen-in-latin-america>
- International Energy Agency. (2021d). *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*. IEA Publications. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- International Energy Agency. (2021e). *World Energy Outlook 2021*. IEA Publications. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>
- International Renewable Energy Agency. (2017). *Turning to renewables: Climate-safe energy solutions*. IRENA. <https://irena.org/publications/2017/Nov/Turning-to-renewables-Climate-safe-energy-solutions>
- International Renewable Energy Agency. (2020). *Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolyzers to meet the 1.5°C climate goal*. IRENA. <https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction>
- International Renewable Energy Agency. (2021a). *Decarbonising end-use sectors: Practical insights on green hydrogen*. IRENA. <https://www.irena.org/publications/2021/May/Decarbonising-end-use-sectors-green-hydrogen>
- International Renewable Energy Agency. (2021b). *Sector Coupling in Facilitating Integration of Variable Renewable Energy in Cities*. IRENA. <https://www.irena.org/publications/2021/Oct/Sector-Coupling-in-Cities>

- Li, L., Manier, H., & Manier, M.-A. (2019). Hydrogen supply chain network design: An optimization-oriented review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103, 342–360. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.060>
- Lorca, Á., Sauma, E., & Tapia, T. (2020). *Informe Proyecto ARClím: Sistema Eléctrico [ARClím Project Report: Power System]*. Centro Energía UC y Centro de Cambio Global UC coordinado por Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia y Centro de Cambio Global UC para el Ministerio del Medio Ambiente a través de La Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). [UC Energy Center and UC Global Change Center coordinated by Center of Climate Science and Resilience and UC Global Change Center for the Ministry of Environment through the Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).] https://arclim.mma.gob.cl/media/informes_consolidados/08.SISTEMA.ELECTRICO.pdf
- Mena, R., Escobar, R., Lorca, Á., Negrete-Pincetic, M., & Olivares, D. (2019). The impact of concentrated solar power in electric power systems: A Chilean case study. *Applied Energy*, 235, 258–283. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.088>
- Ministry of Energy of Chile. (2020a). *Carbono neutralidad en el sector energía: Proyección de consumo energético nacional 2020 [Carbon neutrality in the energy sector: Projection of national energy consumption 2020]*. https://energia.gob.cl/sites/default/files/pagina-basica/informe_resumen_cn_2019_v07.pdf
- Ministry of Energy of Chile. (2020b). *Plan de Retiro y/o Reconversión de Unidades de Carbón [Plan to Phase out and/or Reconvert Coal Units]*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. https://energia.gob.cl/sites/default/files/plan_de_retiro_y_o_reconversion_centrales_carbon.pdf
- Ministry of Energy of Chile. (2020c). Repositorio - Proceso de Planificación Energética de Largo Plazo [Repository - Long-term Energy Planning Process]. <https://energia.gob.cl/pelp/repositorio>
- Ministry of Energy of Chile. (2021a). *INFORME PRELIMINAR Proceso Quinquenal PELP 2023-2027 [Preliminary report: 2023-27 PELP Quinquennal Process]*. https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/pelp2023-2027_informe_preliminar.pdf
- Ministry of Energy of Chile. (2021b). *National Green Hydrogen Strategy*. <https://www.energia.gob.cl/h2>

- Ministry of Environment of Chile. (2020). *4to Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático [4th Biennial Update Report on Climate Change of Chile]*.
- Palma-Behnke, R., Abarca del Río, R., Agostini, C., Alvear, C., Amaya, J., Araya, P., Arellano, N., Arriagada, P., Avilés, C., Barría, C., Berg, A., Buchuk, D., Cardemil, J., Dall'Orso, F., Domínguez, M. P., Escauriaza, C., Feijoo, F., Figueroa, A., & Flores, S., C. ... Vicuña. (2021). *The Chilean Potential for Exporting Renewable Energy*. (Mitigation; Energy Working Group Report). Santiago: Comité Científico de Cambio Climático; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.
- Presidency Press of Chile. (2019). *Presidente Piñera potencia anuncio de carbono neutralidad al 2050 con líderes de Alemania, Francia, España, Reino Unido y Holanda [President Piñera boosts announcement of carbon neutrality by 2050 with leaders from Germany, France, Spain, United Kingdom and the Netherlands]*. Retrieved November 5, 2021, from <https://prensa.presidencia.cl/fotonoticia.aspx?id=98046>
- Quiroga, D., Sauma, E., & Pozo, D. (2019). Power system expansion planning under global and local emission mitigation policies. *Applied Energy*, 239, 1250–1264. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.001>
- Samsatli, S., Staffell, I., & Samsatli, N. J. (2016). Optimal design and operation of integrated wind-hydrogen-electricity networks for decarbonising the domestic transport sector in Great Britain. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(1), 447–475. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.10.032>
- Senate of the Republic of Chile. (2021). *Energía renovable: quieren que el Sistema Eléctrico Nacional no use combustión fósil al 2030 [Renewable energy: they want the National Electric System to be fossil fuel free by 2030]*. Retrieved November 5, 2021, from <https://senado.cl/energia-renovable-quieren-que-el-sistema-electrico-nacional-no-use>
- Stöckl, F., Schill, W.-P., & Zerrahn, A. (2021). Optimal supply chains and power sector benefits of green hydrogen. *Scientific Reports*, 11(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92511-6>
- Taylor, J. A., Dhople, S. V., & Callaway, D. S. (2016). Power systems without fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1322–1336. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.083>

- United Nations Framework Convention on Climate Change. (n.d.). *The Paris Agreement*. Retrieved November 3, 2021, from <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- Vásquez, R., Salinas, F., & Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. (2019). *Tecnologías del hidrógeno y perspectivas para Chile [Hydrogen technologies and perspectives for Chile]* (2nd ed.). Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. <https://www.4echile.cl/publicaciones/tecnologias-del-hidrogeno-y-perspectivas-para-chile-2019/>
- Verástegui, F., Lorca, Á., Negrete-Pincetic, M., & Olivares, D. (2020). Firewood heat electrification impacts in the Chilean power system. *Energy Policy*, 144, 111702. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111702>
- Wang, A., van der Leun, K., Peters, D., Buseman, M., et al. (2020). *European hydrogen backbone: How a dedicated hydrogen infrastructure can be created*. https://gasforclimate2050.eu/sdm_downloads/european-hydrogen-backbone/
- Welder, L., Stenzel, P., Ebersbach, N., Markewitz, P., Robinius, M., Emonts, B., & Stolten, D. (2019). Design and evaluation of hydrogen electricity reconversion pathways in national energy systems using spatially and temporally resolved energy system optimization. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(19), 9594–9607. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.194>
- Yang, G., Jiang, Y., & You, S. (2020). Planning and operation of a hydrogen supply chain network based on the off-grid wind-hydrogen coupling system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(41), 20721–20739. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.207>

Modelamiento de interacciones energéticas y dinámica temporal



Características detalladas del caso de estudio

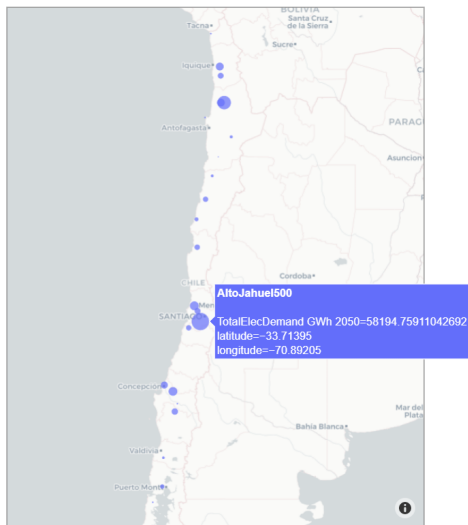
La siguiente tabla resume las características de la representación utilizada para el Sistema Eléctrico Nacional:

<i>Time Horizon</i>	<i>Target years</i>	Nodos	Líneas	Generadores	RD's	<i>Time points</i> por RD
2020-2050	2020, 2030, 2040, 2050	26	28	1120	12	9

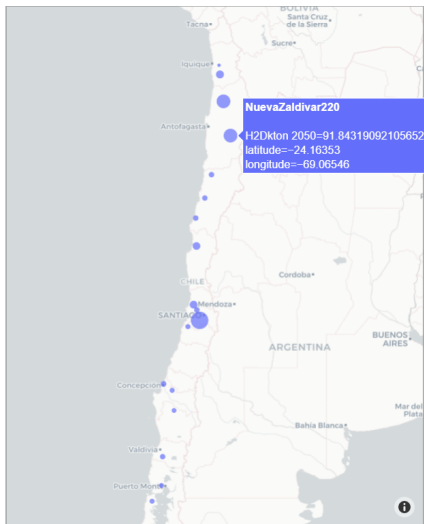
Nota: RD se refiere a día representativo.

El modelo de optimización fue implementado en el lenguaje Julia, usando el entorno JuMP, y resuelto con Gurobi 9.0.3 en un computador que cuenta con un procesador Intel® i5® 10500 y 32GB de memoria RAM.

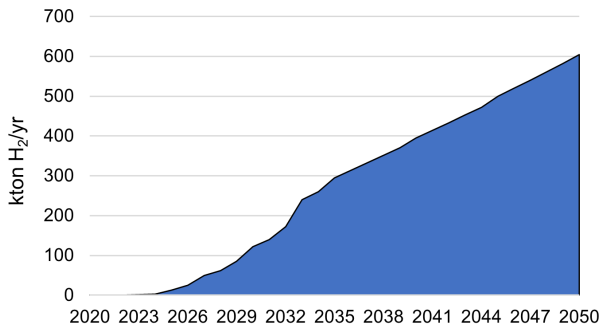
Input: distribución geográfica de la demanda eléctrica (2050)



Input: distribución geográfica de la demanda de hidrógeno (2050)



Input: evolución de la demanda nacional de hidrógeno



Esta demanda considera los siguientes usos:

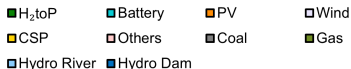
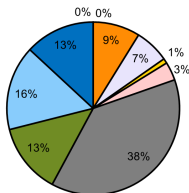
- ▶ Camiones FC para transporte de carga
- ▶ Usos motrices en minería e industria (reemplazo diésel)
- ▶ Sustitución de gas natural residencial e industrial

Ministerio de Energía (2020) y GIZ (2020)

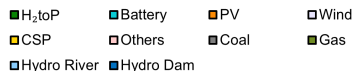
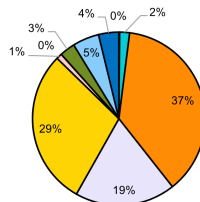
Evolución del mix de generación: caso base

El sistema evolucionaría desde una dominancia de combustibles fósiles a un predominio de energía solar FV, CSP y eólica

Mix generación 2020

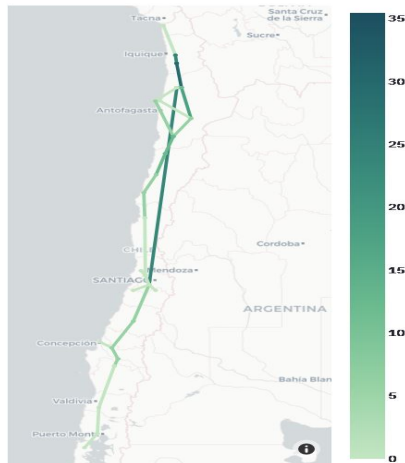


Mix generación 2050

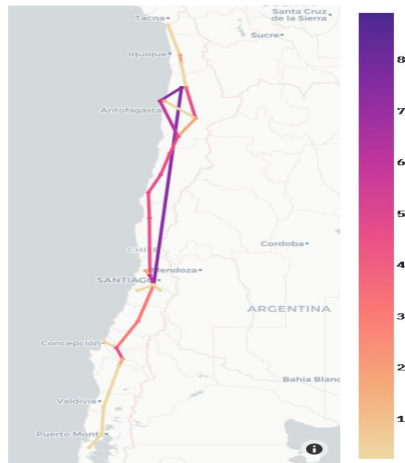


Representación geográfica - capacidad de transporte energía 2050 (caso base)

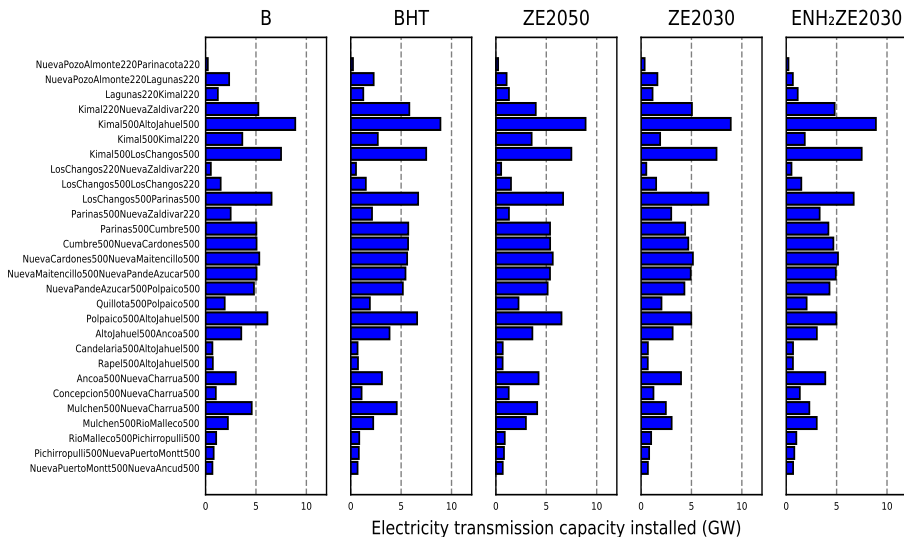
H2 capacity (ton/hr) of transmission lines in 2050



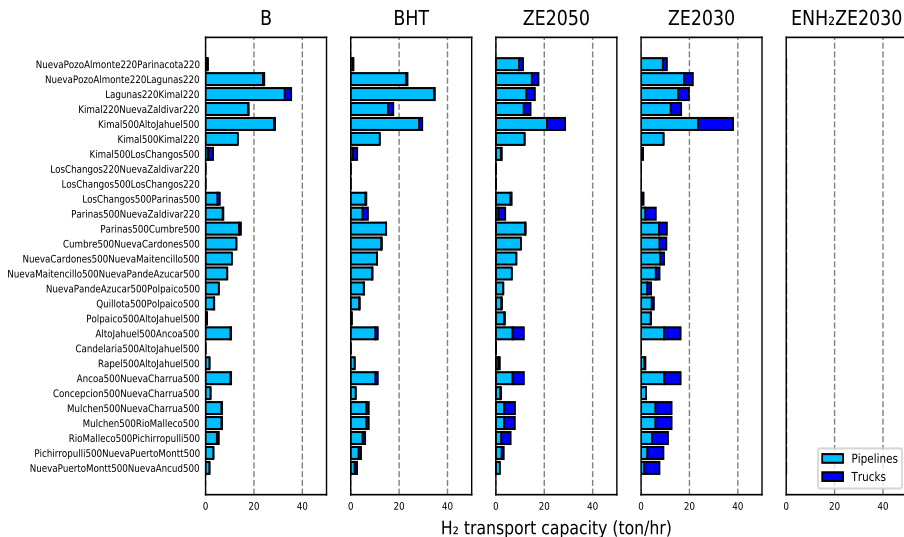
Electric capacity (GW) of transmission lines in 2050



Capacidad de transmisión eléctrica: comparativa (2050)

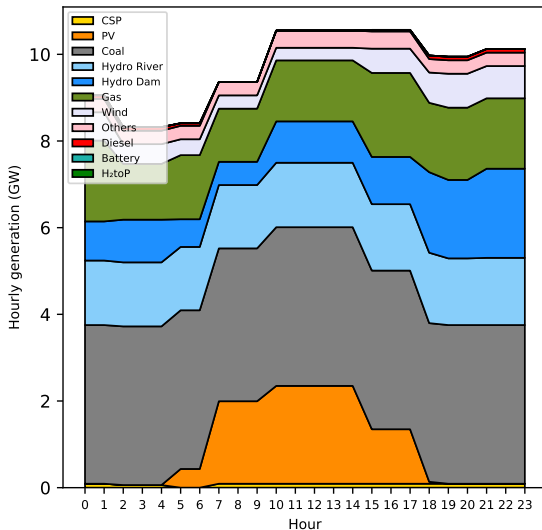


Capacidad de transporte de H_2 : comparativa (2050)



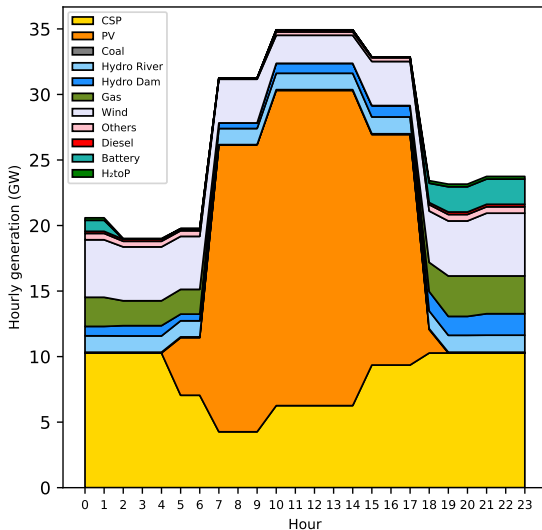
Generación horaria óptima caso base (2020)

Día representativo 2 (trimestre 1)



Generación horaria óptima caso base (2050)

Día representativo 2 (trimestre 1)



Curva de carga sistémica por electrólisis: caso base

Día representativo 2 (trimestre 1)

