

Reptes i èxits en la transició renovable

CETIM

Col·legi d'Enginyers Graduats i d'Enginyers Tècnics Industrials de Manresa

Mar Reguant
(IAE-CSIC)

Desembre
2025

Gran impuls en el sector elèctric per descarbonitzar i electrificar

- Necessitat de reduir les emissions de gasos amb efecte d'hivernacle (GEH).
- El sector elèctric ($\approx 35\text{-}40\%$ de les emissions de CO_2) ha estat el **més actiu** i té el major potencial per fer la transició.
- Ambició d'avançar cap a l'**electricitat lliure de carboni** per al 2035-40 a moltes regions.
- **Límits a la descarbonització:**
 - ▶ La **intermitència de les renovables** pot conduir a un possible desajustament entre l'oferta i la demanda, augmentant la necessitat de flexibilitat.
 - ▶ **Necessitat de millorar la infraestructura complementària** en alta i baixa tensió.
 - ▶ **Vulnerabilitats** a causa dels impactes climàtics.
 - ▶ **Creixents pressions** degudes a la descarbonització d'altres sectors (vehicles, calefacció, etc.).

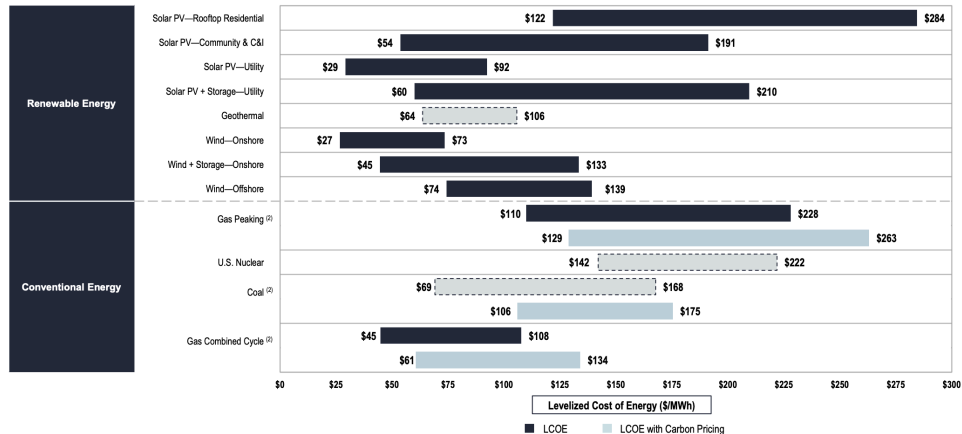
Com ho estudiem des de l'economia de l'energia?

- Combinem models teòrics, dades, i simulacions computacionals per a examinar com es comporten aquests mercats.
- A la banda de l'**oferta**:
 - ▶ Dades: De mercats elèctrics (preus, quantitats, ofertes), d'emissions, etc.
 - ▶ Mètodes quantitatius: Anàlisis estadístic, models de MIP.
- A la banda de la **demanda**:
 - ▶ Dades: Enquestes a consumidors, dades de comptadors intel·ligents, dades agregades, etc.
 - ▶ Mètodes: Anàlisi estadístic, experiments.
- Emfatitzem temes d'eficiència, comportament estratègic i temes socials/distributius. Sovint simplifiquem els temes tècnics.
- Avui us parlaré sobre renovables, però també treballo en altres temes.

Les renovables ja son efectives a nivell de cost

Levelized Cost of Energy Comparison—Sensitivity to Carbon Pricing

Carbon pricing is one avenue for policymakers to address carbon emissions; a carbon price range of \$40 – \$60/Ton⁽¹⁾ of carbon would increase the LCOE for certain conventional generation technologies, as indicated below



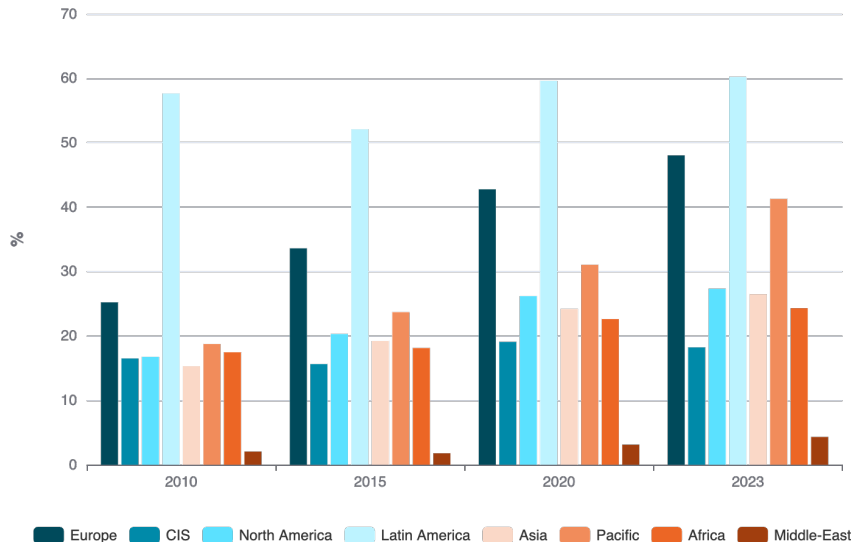
Source: Lazard and Roland Berger estimates and publicly available information.

Note: Unless otherwise noted, the assumptions used in this sensitivity correspond to those used in the LCOE analysis as presented on the page titled "Levelized Cost of Energy Comparison—Version 17.0".

(1) In November 2023, the U.S. Environmental Protection Agency proposed a \$204/Ton social cost of carbon.

(2) The low and high ranges reflect the LCOE of selected conventional generation technologies including an illustrative carbon price of \$40/Ton and \$60/Ton, respectively.

Amb creixent presència, però lluny de “net-zero”



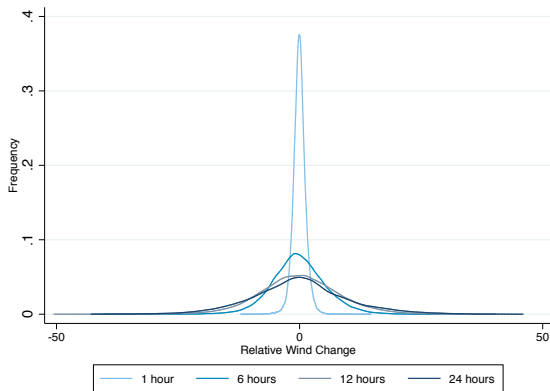
Reptes substancials continuen existint...

- Diverses preocupacions podrien frenar l'avanç de la transició energètica:
 - ▶ Intermitència i regulació de la freqüència
 - ▶ Transmissió i fiabilitat
 - ▶ Actius immobilitzats i el cost del finançament
 - ▶ Acceptabilitat i equitat, preus i transicions laborals
 - ▶ Pressió fiscal fins i tot dins de les polítiques climàtiques: adaptació & mitigació
 - ▶ Reorganització geopolítica del comerç, per exemple, amb la fixació del preu del carboni i nous aranzels.
 - ▶ Etc.
- Parlaré d'algunes d'aquestes qüestions amb exemples de la meva recerca.

Repte 1: Intermitència

Timing

- L'energia eòlica i solar no es poden “activar” segons la demanda.
- Cal ajustar les operacions per estar preparats quan aquestes fonts no estiguin disponibles.
- L'energia eòlica i solar també redueixen la inèrcia del sistema.
- Poden augmentar la volatilitat i la incertesa en el mercat.
- Molt progrés en aquest camp.



Repte 2: La xarxa no es va construir per les renovables

Geografia

- Les centrals elèctriques convencionals es poden situar prop dels centres de demanda
 - ▶ Es necessiten poques línies de transmissió per connectar l'oferta i la demanda
- En canvi, les energies renovables sovint es generen millor en llocs remots
 - ▶ Les regions amb abundància de renovables no estan ben integrades amb els centres de demanda
- Gran inversió que requereix coordinació, amb dificultats en l'economia política i el procés regulador.



Contents

I. Cas d'estudi del MIBEL: Intermitència

II. Cas d'estudi de Xile: Xarxa

Conclusions

I. Cas d'estudi del MIBEL: Intermitència

Els impactes del vent al MIBEL

- **Pregunta:** Quins han estat els impactes de la generació eòlica en l'última dècada?
- **Mètodes:** Anàlisi de regressió de les dades operatives horàries (preus, costos de congestió, beneficis d'emissions, etc.).
- **Coautors:** Claire Petersen i Lola Segura-Varo
- **Conclusions:**
 - ▶ Els consumidors han sortit beneficiats, fins i tot tenint en compte el cost de les subvencions. El disseny del mercat pot afectar aquests beneficis.
 - ▶ La innovació en el funcionament del mercat ha contribuït a augmentar els beneficis.

Diversos estudis exploren els beneficis

- Cullen (2013) i Novan (2015) mesuren els beneficis en reducció d'emissions derivats de la producció eòlica.
- Bushnell i Novan (2021) mesuren els impactes en preus de la solar a Califòrnia.
- Abrell, Kosch i Rausch (2019) avaluen els impactes de l'eòlica i la solar a Alemanya i Espanya.
- Liski, M., i Vehviläinen (2020) avaluen els impactes de l'eòlica al mercat nòrdic.
- Gowrisankaran, Reynolds i Samano (2016) construeixen un model estructural per analitzar polítiques òptimes de fiabilitat.
- Fell, Kaffine i Novan (2021) analitzen els impactes ambientals de les renovables amb més transmissió.
- ...

En aquest article ens centrem en el **cost de la intermitència**.

Dades

- Utilitzem dades horàries del mercat elèctric espanyol (2009-2018). Dades de REE i OMIE.
- Les dades inclouen: preus de mercat, costos d'intermitència, congestió i altres serveis de fiabilitat, dades d'emissions (tones/CO₂), subvencions rebudes (milions), etc.
- **Quantifiquem l'impacte de l'eòlica** sobre aquestes variables:
 - ▶ Beneficis: reduccions d'emissions, menor ús de combustibles, reduccions de preus per als consumidors.
 - ▶ Costos: augment dels costos d'intermitència (pagats pels consumidors i per les instal·lacions eòliques), reduccions de preus per als consumidors.

Estratègia d'identificació

- Donada l'aleatorietat en les previsions de vent, estimem una regressió dels impactes de l'eòlica sobre aquestes variables.
- **Enfocament amb splines** per analitzar l'impacte en diferents quintils:

$$Y_t = \beta_0 + \sum_{q=1}^5 \beta_q W_{qt} + \gamma X_t + \epsilon_t ,$$

on W_{qt} són intervals (bins) de splines segons els quintils de la variable de vent.

- Examinem tant els costos *mitjans* previstos com els *efectes marginals*.

Nota sobre l'endogeneïtat

- La producció eòlica pot ser endògena degut a:
 - ▶ Retallades (curtailment).
 - ▶ Comportament estratègic.
- Utilitzem el vent previst, ja sigui directament o com a instrument de la producció efectiva.

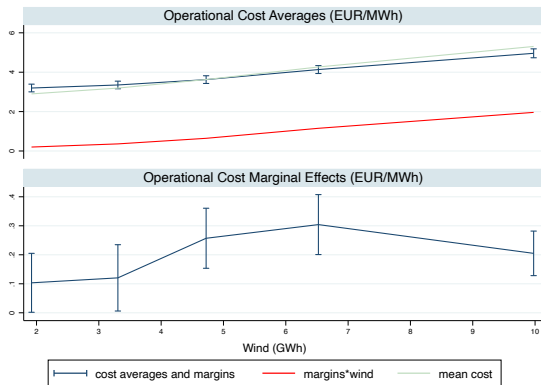
VARIABLES	(1) Wind Forecast	(2) Wind	(3) IV Forecast	(4) IV Power
Forecasted wind (GWh)	0.191 (0.0162)			
Final wind production (GWh)		0.152 (0.0140)	0.182 (0.0150)	0.188 (0.0189)
Observations	83,840	83,841	83,840	81,348
R-squared	0.561	0.557	0.079	0.079

Èmfasi en els costos operatius

- A la literatura, sovint es posa molt d'èmfasi en els costos de la intermitència dels recursos renovables.
- En aquest article ens centrem a quantificar els costos d'intermitència al mercat.
- *Ha contribuït l'eòlica a grans augments dels costos operatius?*
- Identifiquem els costos d'intermitència com els costos (comptables) de proveir gestió de congestió, serveis de fiabilitat, equilibratge, etc.

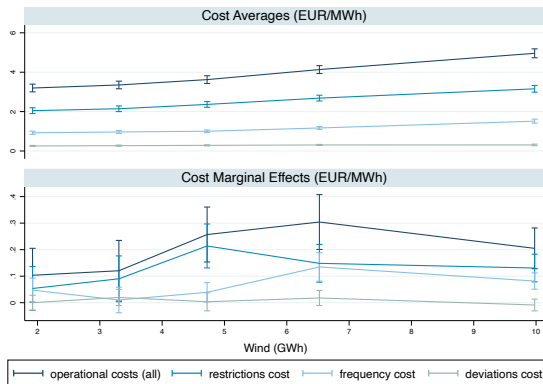
Resultats per als costos operatius

- Els costos operatius augmenten amb més eòlica.
- Tanmateix, no augmenten de manera dramàtica.
- Els efectes marginals no augmenten.



Descomposició dels costos operatius

- Quantifiquem els efectes sobre diferents serveis operatius.
- La congestió augmenta amb l'eòlica.



Intermitència i la importància del disseny de mercat

- Hi ha hagut debats sobre el valor de les renovables a causa de la seva intermitència i de la presència de restriccions tècniques.
- Els costos d'integrar l'energia eòlica al mercat elèctric poden dependre de **com de ben dissenyat està el mercat**.
- El disseny de mercat també interactua amb les **subvencions**.
 - ▶ Per exemple, preus negatius a Texas o Alemanya, preus zero a Espanya.
- Diversos mercats han adaptat el seu funcionament per acomodar l'energia renovable:
 - ▶ *Califòrnia*: mercat EIM per permetre el comerç entre regions.
 - ▶ *Alemanya*: mercats de mitja hora (en lloc d'horaris).
 - ▶ *Europa*: avanç cap a la negociació contínua per tenir més flexibilitat.

Resum

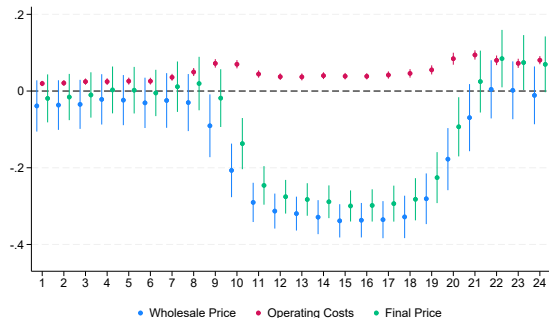
- Les inversions en energia eòlica van tenir un impacte positiu en el benestar per un cost social del carboni raonable.
- De mitjana, la política va beneficiar tant consumidors com productors.
- Els detalls sobre el disseny del mercat i la compensació poden afectar substancialment els guanyadors i perdedors.
- Sovint es percep com un error costós, però un gran èxit inicial en les polítiques climàtiques ha fet que més del 20% de la generació a Espanya provenguin de l'energia eòlica.
- Els canvis regulatoris poden proporcionar innovacions útils que redueixen costos.

I la solar? Treball en curs amb David Brown (U of Alberta)

- **Pregunta:** Com estan funcionant els mercats de fiabilitat i com caldria redissenyar-los? Com difereix l'impacte entre l'eòlica i la solar?
- **Mètodes:** Anàlisi detallada de dades d'ofertes a nivell d'unitat, combinant estadística descriptiva (de moment) i modelització estructural (pendent).
- **Detalls de les dades:**
 - ▶ Les dades espanyoles dels mercats auxiliars tenen un nivell de detall sense precedents.
 - ▶ Podem examinar les estratègies d'oferta de cada empresa, com s'actualitzen al llarg del temps i com interactuen amb el mercat diari i altres mercats d'energia, etc.

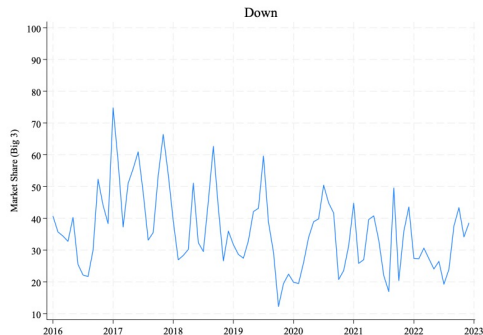
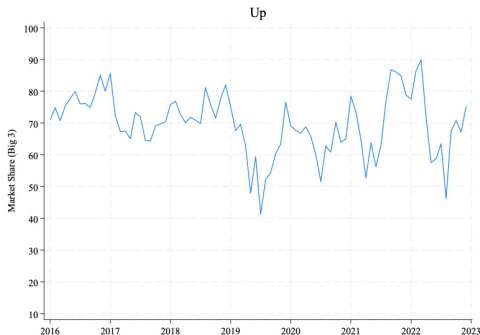
Ampliem el període de dades per incloure la presència de la solar

- Els impactes de la intermitència de la solar poden ser més grans sobre els costos, tot i que el panorama general es manté.
- Tanmateix, s'observen alguns preus molt elevats en determinades hores.



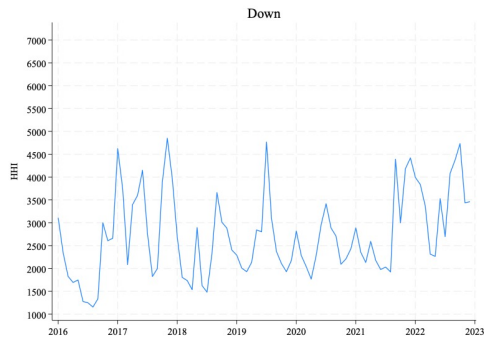
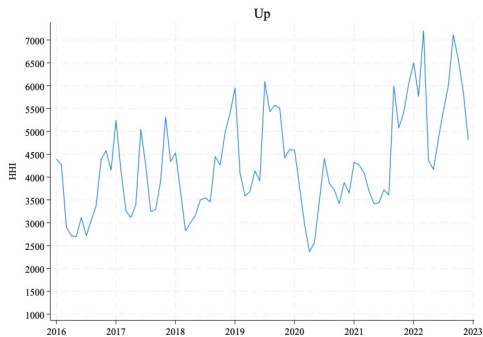
Observem indicis de preocupació

- La potència de reserva està especialment concentrada en les empreses més grans, sovint amb molt poques centrals oferint els seus serveis en una àrea de regulació determinada.
- Això pot fer el sistema fràgil, tal com es va observar durant l'apagada.



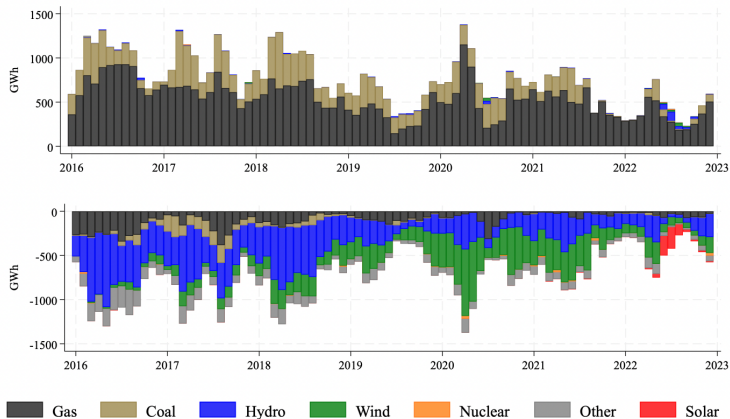
Observem indicis de preocupació

- Els índexs HHI estàndard poden arribar a valors tan elevats com 7000 en els darrers anys, i això sense tenir en compte la segmentació del mercat per àrees de regulació.



Competència entre els últims recursos disponibles

- La competència al mercat de restriccions (i productes relacionats) només augmentarà a mesura que s'incorporin al mercat noves fonts (p. ex., bateries, instal·lacions renovables híbrides).



La necessitat d'una regulació adaptativa

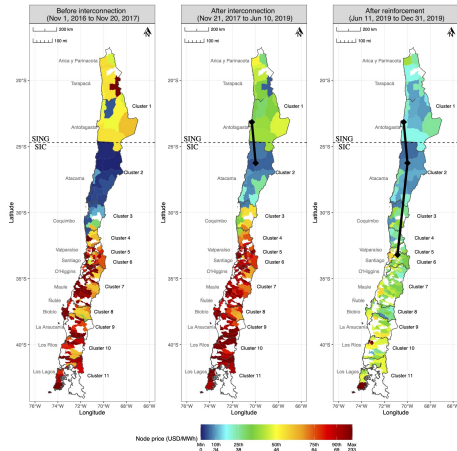
- OMIE està treballant per millorar la participació d'altres unitats en aquests mercats auxiliars, però l'apagada ha suposat una gran frenada.
- Alguna experiència prèvia permetent que els parcs eòlics ofereixin serveis de “baixada” suggereix que la competència pot augmentar substancialment, amb alguna evidència preliminar el 2022.
- Una correcta fixació de preus d'aquests serveis i del despatx de recursos pot evitar desplaçar alternatives millors i hauria d'incentivar l'entrada de bateries al sistema.
- Treball encara molt preliminar: dades gairebé infinites i molts canvis regulatoris en curs.

Continuarà...

II. Cas d'estudi de Xile: Xarxa

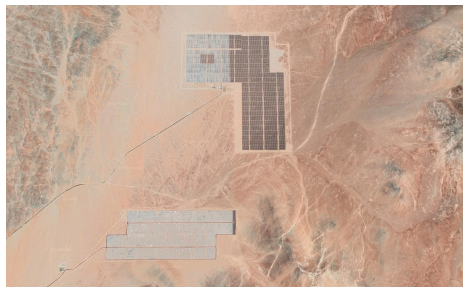
Gonzales, Ito, and Reguant (2023)

- **Pregunta:** Quin és el cost-benefici del projecte d'expansió de la transmissió a Xile?
- **Mètodes:** estudi d'esdeveniments + model estructural del mercat elèctric xilè.
- **Coautors:** Luis Gonzales i Koichiro Ito
- **Conclusions:**
 - Destaquem els beneficis dinàmics de l'expansió de la xarxa, que permeten augmentar l'expansió de les renovables.
 - El cost de la transmissió es pot recuperar ràpidament, fins i tot ignorant els beneficis afegits pel canvi climàtic.

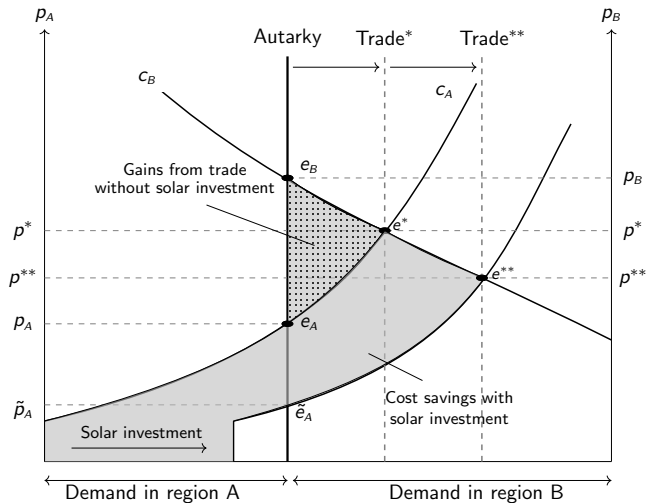


Un estudi de cas de Xile

- El context xilè ofereix un estudi de cas únic.
- Xile disposa de grans recursos solars, però les millors ubicacions estan desconnectades dels centres de demanda (Antofagasta i el desert d'Atacama).
- Xile va connectar amb èxit aquestes zones mitjançant ambiciosos projectes de xarxa els anys 2017 i 2019.
- Proporcionem una quantificació *dinàmica* dels beneficis.



Resum de l'article en una imatge



Impactes estàtics: efectes d'estudi d'esdeveniments de la línia

$$c_t = \alpha_1 I_t + \alpha_2 R_t + \alpha_3 c_t^* + \alpha_4 X_t + \theta_m + u_t$$

■ El nostre mètode utilitza idees de Cicala (2022)

- ▶ c_t és el cost observat
- ▶ c_t^* és el cost nacional segons l'ordre de mèrit (el cost mínim possible de despatx amb comerç complet a Xile)
- ▶ $I_t = 1$ després de la interconnexió; $R_t = 1$ després del reforç
- ▶ X_t és un conjunt de variables de control; θ_t són efectes fixos mensuals
- ▶ α_1 i α_2 són els impactes de la interconnexió i del reforç

Impactes estàtics: efectes d'estudi d'esdeveniments de la línia

	Hour 12		All hours	
1(After the interconnection)	-2.42	(0.26)	-2.07	(0.17)
1(After the reinforcement)	-0.96	(0.58)	-0.61	(0.37)
Nationwide merit-order cost	1.12	(0.03)	1.03	(0.01)
Coal price [USD/ton]	-0.03	(0.01)	-0.01	(0.01)
Natural gas price [USD/m ³]	-10.36	(4.33)	-0.65	(3.09)
Hydro availability	0.43	(0.14)	0.00	(0.00)
Scheduled demand (GWh)	-0.51	(0.13)	-0.01	(0.00)
Sum of effects	-3.38		-2.68	
Mean of dependent variable	35.44		38.63	
Month FE	Yes		Yes	
Sample size	1033		1033	
R ²	0.94		0.97	

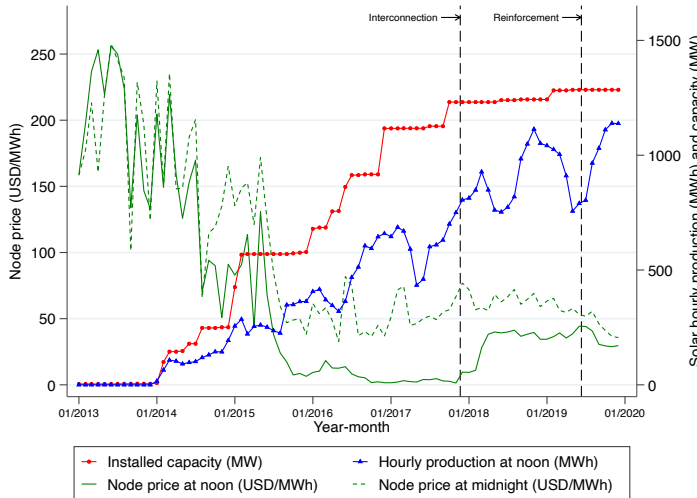
Aquesta anàlisi estàtica d'estudi d'esdeveniments capta l'impacte total?

- La nostra teoria suggeria:

- ▶ Sí, si la inversió solar es produeix **simultàniament** amb la integració
- ▶ No, si la inversió solar es produeix en **anticipació** de la integració

La inversió solar es va produir en anticipació de la integració

- La inversió solar va començar després de l'anunci de la integració el 2014
- Les plantes van entrar “massa aviat”.
 - ▶ [→] L'anàlisi estàtica no capta l'impacte total de la integració de mercats
 - ▶ [→] Abordem aquest repte a la secció següent



Construcció d'un model per capturar l'efecte total

- Els impactes de la xarxa poden ser estàtics i dinàmics:
 - ▶ Beneficis de producció: es pot enviar més solar als centres de demanda, els preus a les regions solars augmenten.
 - ▶ Beneficis d'inversió: es construeix més capacitat solar.
- Destaquem que un estudi d'esdeveniments probablement només captarà el primer tipus d'efectes (per exemple, al voltant del moment de l'expansió).
- Construïm un model del mercat elèctric xilè per quantificar els beneficis de la integració de mercats, incloent-hi els seus efectes sobre la inversió.

Un model estructural per estudiar un efecte dinàmic sobre la inversió

- Dividim el mercat xilè en cinc mercats regionals amb interconnexions entre regions (actualment en expansió fins a 11)
- El model resol una optimització amb restriccions per trobar el despatx òptim que minimitza el cost de generació
- Restriccions:
 - 1 Demanda horària = (oferta horària - pèrdues de transmissió)
 - 2 La funció d'oferta es basa en dades horàries de costos a nivell de planta
 - 3 La demanda es basa en dades horàries de demanda a nivell de node
 - 4 Capacitat de transmissió entre regions:
 - ▶ Capacitat de transmissió real en cada període de temps
 - ▶ Contrafactual: com si Xile no hagués integrat els mercats



Calibrem el model amb dades detallades de mercat

■ Model de xarxa

- ▶ Agrupació *k-means* dels preus provincials en 5 zones, i fluxos observats entre clústers per fixar la transmissió.

■ Corba d'oferta:

- ▶ basada en la producció observada i/o en els costos reportats observats.

■ Demanda:

- ▶ basada en dades a nivell de node, agregades als clústers.

■ Potencial solar:

- ▶ basat en dies sense congestió de transmissió.

■ Cost de la solar:

- ▶ basat en la condició de benefici zero.

El cost i el benefici de les inversions en transmissió

■ Cost de la interconnexió i del reforç

- ▶ \$860 milions i \$1.000 milions (Raby, 2016; Isa-Interchile, 2022)

■ Benefici—ens centrem en tres mesures de benefici

- ▶ Canvis en l'excedent del consumidor
- ▶ Canvis en els ingressos nets de la solar (= ingressos – cost d'inversió)
- ▶ Canvis en les externalitats ambientals

Resultats cost-benefici

Table: Cost-Benefit Analysis of Transmission Investments

	(1)	(2)
Modelling assumptions		
Investment effect due to lack of integration	No	Yes
Benefits from market integration (million USD/year)		
Savings in consumer cost	176.3	287.6
Savings in generation cost	73.4	218.7
Savings from reduced environmental externality	-161.4	249.4
Increase in solar revenue	110.7	183.5
Costs from market integration (million USD)		
Construction cost of transmission lines	1860	1860
Cost of additional solar investment	0	2522
Years to have benefits exceed costs		
With discount rate = 0	14.8	6.1
With discount rate = 5.83%	> 25	7.2
With discount rate = 10%	> 25	8.4
Internal rate of return		
Lifespan of transmission lines = 50 years	6.95%	19.67%
Lifespan of transmission lines = 100 years	7.23%	19.67%

Resum

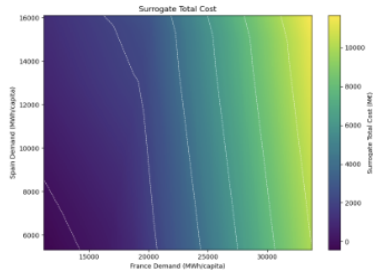
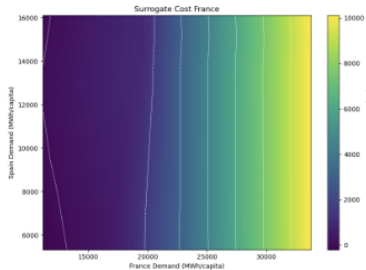
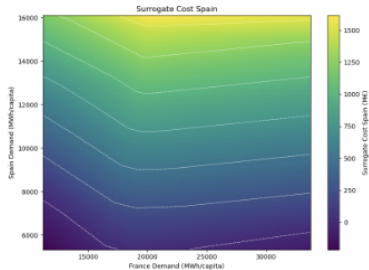
- Amb el model, podem calcular els beneficis de la línia, amb i sense els efectes de la inversió.
- Hem trobat que els efectes de la inversió són claus per justificar el cost de la línia.
- La línia també era molt atractiva des de la perspectiva del benestar dels consumidors, fins i tot amb una taxa de descompte del 5,83% (la taxa oficial de Xile).
- L'economia política fa que l'expansió de les renovables sigui "fàcil" a Xile.
- Com podem reduir els desafiaments de l'economia política en altres jurisdiccions?

Treball preliminar en curs amb David Andrés-Cerezo (UAB) i Juan Mercatante (PSE)

- **Pregunta:** Com afecten els interessos polítics la viabilitat i la forma de la xarxa? Quin és el conjunt factible i com depèn de l'assignació de costos?
- **Mètodes:** Model detallat del sistema elèctric europeu combinat amb models macro estilitzats dels estats membres.
- **Detalls computacionals:**
 - ▶ Ús de mètodes d'aprenentatge automàtic per crear un model de baixa dimensionalitat que reflecteixi amb precisió l'impacte de la inversió en transmissió sobre els preus i la inversió en centrals elèctriques.
 - ▶ Integració del model en un model macroeconòmic de nivell superior amb treball, capital i electricitat com a principals inputs.

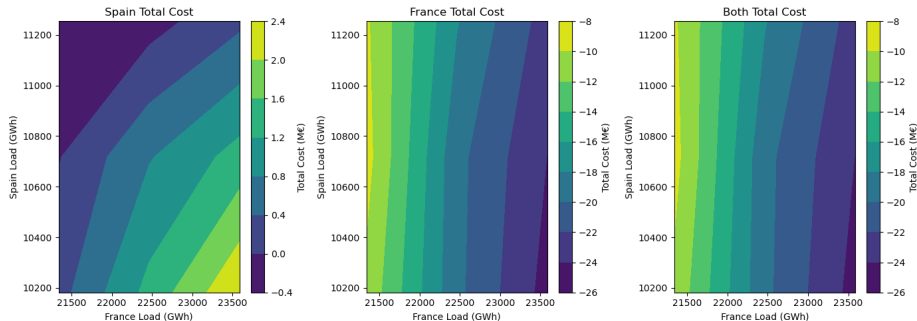
Exemple estilitzat amb França i Espanya

- Resolem l'assignació horària òptima i la inversió a llarg termini per a un nivell donat de demanda agregada francesa i espanyola (de moment, subjecte a supòsits sobre el comportament horari dels diferents consumidors).
- Aquesta superfície aproximada proporciona els costos òptims agregats i els costos per a cada país, amb relacions que poden ser no lineals.



Exemple estilitzat amb França i la península – construcció d'una línia

- Podem analitzar el benefici de construir una interconnexió més gran entre ambdós països.
- La península guanya o perd, però de manera marginal. França en surt més beneficiada. Altres països també es veuen afectats a causa de les externalitats de xarxa!
- Això contrasta amb quantificacions anteriors dels beneficis de la línia.
- A més, encara no quantifica plenament els efectes aigües avall sobre la demanda (p. ex., demanda industrial).



Exemple estilitzat amb França i la península – construcció d'una línia

- Podem analitzar el benefici de construir una interconnexió més gran entre ambdós països.
- La península guanya o perd, però de manera marginal. França en surt més beneficiada. Altres països també es veuen afectats a causa de les externalitats de xarxa!
- Això contrasta amb quantificacions anteriors dels beneficis de la línia.
- A més, encara no quantifica plenament els efectes aigües avall sobre la demanda (p. ex., demanda industrial).

TSOs' estimate

The savings in fuel costs enabled by the interconnector, coined as socio-economic welfare (SEW) in the TYNDP, represent the main part of these benefits. The TYNDP published in 2016 provides the gross estimates for these savings, which have been split between countries by the TSOs in their investment request. The figures are as follows:

Spot year	2020 EP	2030 V1	2030 V2	2030 V3	2030 V4
SEW Europe (M€/yr)	200	120	150	120	240
SEW France (M€/yr)	51	37	19	35	89
SEW Spain (M€/yr)	110	97	162	70	170

Exemple estilitzat amb França i la península – construcció d'una línia

- Podem analitzar el benefici de construir una interconnexió més gran entre ambdós països.
- La península guanya o perd, però de manera marginal. França en surt més beneficiada. Altres països també es veuen afectats a causa de les externalitats de xarxa!
- Això contrasta amb quantificacions anteriors dels beneficis de la línia.
- A més, encara no quantifica plenament els efectes aigües avall sobre la demanda (p. ex., demanda industrial).

The project was estimated at €1,750m in 2017, half of which would be financed by each partner, with potential cost increases financed by the Spanish transmission system operator (TSO) REE (62.5%) and its French counterpart RTE (37.5%). However, due to unfavourable market context and surging component prices (cables and conversion substations), the estimated total cost has soared to €2,850m, with a risk envelope of €250m. Partners have decided to invest €1,195m each in the project; additional costs between €2,390m and €2,700m will be supported by REE (62.5%) and RTE (37.5%) and extra costs above €2,700m will be financed on a 50:50 basis. Despite rising costs, the project is still considered as beneficial for the two countries and for Europe and it should receive a €578m support from the Connecting Europe Facility (CEF), of which €350m will be granted to RTE.

La necessitat d'incorporar la política industrial a l'economia política

- L'assignació de costos és, en el millor dels casos, estilitzada i una font de debat actiu.
- Els beneficis de la línia de transmissió també són un objectiu mòbil, ja que s'adopten nous projectes renovables i la demanda latent es desplaça (p. ex., refrigeració/calefacció, intel·ligència artificial), creant possibles problemes de compromís atesa la seva llarga durada.
- Cal integrar una anàlisi detallada de la xarxa amb forces macroeconòmiques més agregades.

Continuarà...

Conclusions

Evaluant la transició energètica

- La transició energètica ofereix una oportunitat única per descarbonitzar la generació elèctrica.
- Avaluem els impactes i els reptes de la transició utilitzant un conjunt divers d'eines.
- Encara queden reptes i preocupacions, moltes àrees per a la recerca econòmica.
- **Més detalls?**
 - ▶ Measuring the Impact of Wind Power and Intermittency, with Claire Petersen and Lola Segura, *Energy Economics*.
 - ▶ The Price Impacts of Wind and Solar, with David Brown, *working paper*.
 - ▶ The Investment Effects of Market Integration: Evidence from Renewable Energy Expansion in Chile, with Luis Gonzales and Koichiro Ito, *Econometrica*, 91(5): 1659-1693, 2023.

Moltes gràcies!

★ Bones festes! ★

mar.reguant@iae.csic.es