

# Reservas de energía en la Unión Europea a raíz de la invasión de Rusia a Ucrania en el año 2022

Mariana Yepes Álvarez, Valeria Cardona Velásquez, Hernán Octavio Moreno Mora  
Modelación y Simulación III, Departamento de Ciencias Matemáticas, Carrera Ingeniería Matemática  
Universidad EAFIT  
myepesa@eafit.edu.co, vcardona@eafit.edu.co, homorenom@eafit.edu.co.

**Resumen-** Rusia es el principal proveedor de petróleo y gas a la Unión Europea, supliendo cerca del 50% de sus necesidades y afectando los precios de la energía gracias a su posición dominante en ese mercado [9]. Tras la invasión de Rusia a Ucrania el pasado 24 de febrero del 2022, se hizo evidente una posible crisis energética debido a las sanciones de Occidente. En efecto, transcurridos unos días de la invasión, Occidente ha impuesto a Rusia múltiples sanciones, tales como el embargo de cuentas y fondos de sus principales gobernantes y oligarcas, la exclusión de la mayoría de sus bancos del sistema SWIFT para transacciones internacionales, y la prohibición a compañías occidentales estratégicas de negociar con Rusia. Esto afectará necesariamente al comercio del gas natural y del petróleo, vitales para la economía de los 27 países de la Unión Europea. Nuestro objetivo es modelar y simular a partir de la dinámica de sistemas por medio de diagramas causales y de niveles y flujos, cómo afectarán las sanciones de Occidente a las reservas de energía de la Unión Europea.

**Palabras Clave-** dinámica de sistemas, invasión rusa a Ucrania, Gas Licuado del Petróleo- GLP, reservas de energía, sanciones, energías renovables.

## I. ORIGEN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Este proyecto busca entender cómo se verán afectadas las reservas de energía de la Unión Europea por la invasión de Rusia a Ucrania. El 24 de febrero de 2022, la milicia rusa desplegó una operación militar especial en Ucrania con el fin de, en palabras del líder ruso, Vladimir Putin, “desmilitarizar y desnazificar Ucrania” [1]. El conflicto, cuatro meses después de su inicio, se ha llevado las vidas de 4,149 civiles, según la Oficina del alto Comisionado para los Derechos Humanos de las Naciones Unidas y alrededor de 4945 heridos. Esto se suma a las muertes de 2,870 soldados ucranianos y 30,500 rusos [2] [15].

Para entender el origen de esta invasión, hay que remontarse a finales del siglo XVIII, cuando gran parte del territorio ucraniano pasó a formar parte del imperio ruso bajo el mandato de Catalina la Grande. Ucrania luchó por su independencia a principios del siglo XX, pero perdió y pasó a formar parte de la Unión Soviética.

"Pero fue una entidad separada desde el principio", explicó la historiadora Anne Applebaum en "Sunday Morning" de la CBS. "Siempre tuvo su propia lengua. Siempre tuvo su propio estatus dentro de la URSS". Bajo el dominio de Stalin en la década de 1930, las tierras de cultivo y el trigo de los ucranianos fueron confiscados y la hambruna resultante mató a unos 4 millones de personas.

Ucrania declaró su independencia tras el colapso de la Unión Soviética en 1991. En ese momento, una parte

sustancial del arsenal nuclear soviético se encontraba dentro de las fronteras de Ucrania, que aceptó transferir esas armas a Rusia.

En los últimos años, el gobierno ucraniano, elegido democráticamente, se ha acercado a Europa Occidental, pero los lazos culturales con Rusia, especialmente en la parte oriental del país, de habla rusa, siguen siendo profundos.

"Lo que motiva a Putin", dijo el ex embajador de la OTAN Ivo Daalder a CBS News, "es la preocupación por la independencia de Ucrania: la preocupación de que una democracia funcional, exitosa y próspera en Ucrania represente una amenaza directa para su gobierno, porque dará a la gente en Rusia la idea de que ellos también podrían disfrutar de lo que disfruta Ucrania, y levantarse contra su gobierno autocrático"[3]

Ahora bien, la reacción de la Unión Europea y de los Estados Unidos frente a la invasión ha sido la imposición de una serie de sanciones al gobierno ruso, entre ellas en lo referente a las exportaciones de petróleo y gas. Dentro de estas medidas esta por ejemplo la prohibición por parte de Estados Unidos a todas las importaciones de petróleo y gas ruso y la eliminación por parte de Reino Unido de las importaciones de petróleo ruso para finales de 2022. La UE, que obtiene una cuarta parte de su petróleo y el 40% de su gas de Rusia, dice que cambiará a suministros alternativos y hará que Europa sea independiente de la energía rusa "mucho antes de 2030"[9].

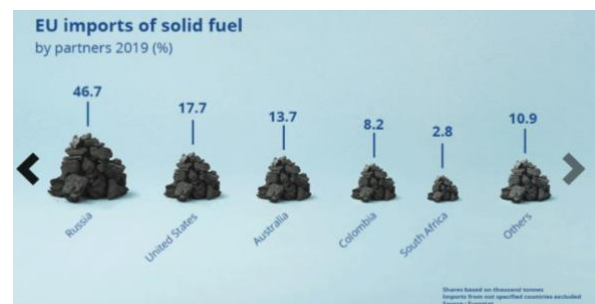


Fig. 1. Importaciones de combustibles sólidos de la Unión Europea 2019

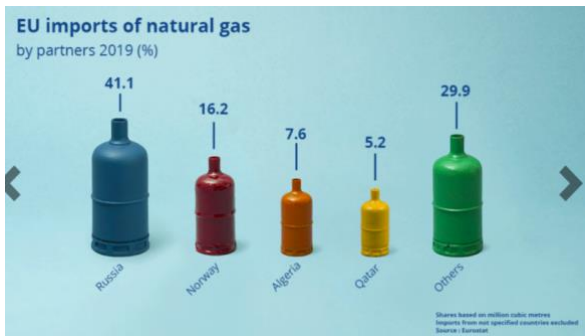


Fig. 2. Importaciones Unión Europea gas natural 2019

Como puede verse en Fig. 2, la Unión Europea dependía en el 2019 de Rusia en un 41.1% de sus importaciones de gas, un 26.9% de sus importaciones de

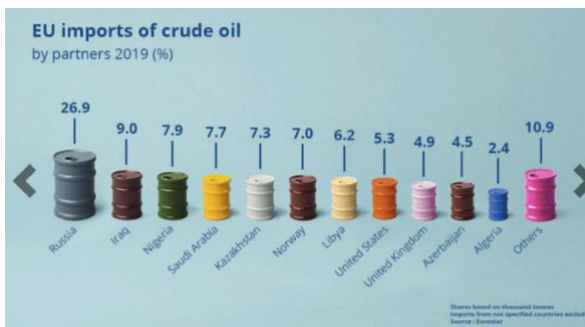


Fig. 3. Importaciones de crudo de petróleo de la Unión Europea, 2019

Petróleo (Fig.3) y un 46.7% de sus importaciones de carbón (Fig1.). [5]

Alemania ha dejado en suspenso la autorización de apertura del gasoducto Nord Stream 2 desde Rusia, el cual va en paralelo con el actual Nord Stream 1 por el fondo del Mar Báltico. Esto adicional a que los países occidentales han congelado los activos del Banco Central de Rusia para impedir que utilice sus reservas de divisas por valor de 630.000 millones de dólares (470.000 millones de libras).

Esto ha hecho que el valor del rublo se desplome un 22% desde principios de año. Esto, a su vez, ha hecho subir el precio de los productos importados y ha provocado un aumento del 14% en la tasa de inflación de Rusia.

Algunos bancos rusos están siendo retirados del sistema internacional de mensajería financiera Swift, que se utiliza para transferir dinero a través de las fronteras. Esto retrasará los pagos a Rusia por las exportaciones de energía [8]. Una consecuencia de esta medida es que Rusia está exigiendo el pago de sus exportaciones en rublos en lugar de dólares, a lo cual muchos países no han accedido.

Ahora, en este contexto, es que resulta pertinente analizar cómo se verán afectadas las reservas de energía de Europa a raíz de estas sanciones. Como ya se mencionó, el 40% de las necesidades de gas que tiene Europa es importado de Rusia. Este gas se usa para calefacción, industria petroquímica, producción de energía eléctrica, entre otros.

La UE y EE. UU. se han visto preocupados por la posible suspensión de las exportaciones de gas y petróleo ruso, cada

vez que le imponen una nueva sanción por la invasión al país vecino. Aunque EE. UU. sólo importa el 8% de sus necesidades de gas de Rusia, está buscando formas alternativas para no depender del gas ruso. Sin embargo, países como Italia y Alemania dependen del gas ruso, y una suspensión de las exportaciones llevaría a unas estrictas medidas de ahorro, y al incremento en los precios de la energía.

La UE está en estado de alerta ante cualquier imprevisto que pueda ocurrir con la invasión a Ucrania. La suspensión o reducción del suministro de gas es una de las posibles consecuencias que traería fatales consecuencias para Europa en este momento. Con este riesgo en mente, se han pensado posibles alternativas y soluciones en caso de una posible crisis. Sumándole a este escenario lo bajas que están las reservas de gas en Europa dado el invierno que apenas se acababa, las reservas son menores en esa época del año. Además, hay que tener en cuenta que, de acuerdo con años anteriores, en octubre del año pasado, el cual es el mes en el que las reservas de gas llegan a su punto máximo, no habían llegado al mismo nivel que suelen llegar. Habían disminuido casi 200 Mmc (millones de metros cúbicos) el volumen de esta reserva. [6]

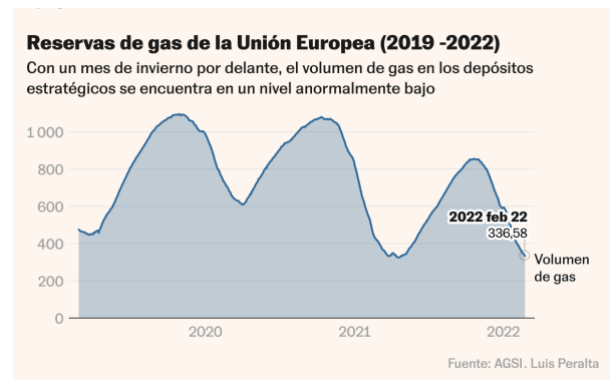


Fig. 4. Reservas de gas de la Unión Europea(2019-2022)

La presidenta de la Comisión Europea, Ursula von der Leyen, ha declarado lo siguiente: «Debemos ser independientes del petróleo, el carbón y el gas rusos. Sencillamente, no podemos confiar en un proveedor que nos amenaza de manera explícita. Tenemos que actuar ahora para mitigar el impacto del aumento de los precios de la energía, diversificar nuestro suministro de gas para el próximo invierno y acelerar la transición hacia una energía limpia.» [9]. De las soluciones alternativas que se han pensado para suspender las importaciones de gas ruso está el uso de energías provenientes de otras fuentes, como, por ejemplo, fuentes renovables. Sin embargo, la capacidad de producción actual de Europa no es suficiente para suplir toda la demanda necesaria y construir más generadores de energía se demora entre 2 y 10 años, pues varían desde hidroeléctricas (2-4 años), hasta fuentes como la energía nuclear (que pueden tardar en construirse entre 5-10 años) y granjas de energía Eólica, también con largos tiempos de construcción.

El centro de estudios Bruegel predice que, si Rusia detuviera el suministro de gas a Europa, esta podría importar más gas natural licuado (GNL) de EE. UU y otros países productores. [7] No obstante, esta solución implicaría unos

altos gastos y tiempo de construcción y manufactura pues habría que transportar el GNL desde el país de origen hasta Europa en buque tanques especiales y construir terminales de descarga en los países consumidores. Actualmente, España cuenta con el mayor número de puertos habilitados para la descarga del GNL, pero no existen gasoductos entre España y la Europa Central. Hay un proyecto desde hace tiempos cruzando los Pirineos, pero no se ha iniciado su construcción. Hoy están tratando de reactivarlo.

## II. OBJETIVOS

Con la invasión de Rusia a Ucrania, se desencadenaron una serie de hechos y preocupaciones respecto a la situación Rusia y sus relaciones comerciales con otros países en el mundo. Nuestro propósito es analizar por medio de la dinámica de sistemas cómo se verán afectadas las reservas de energía en Europa dado el caso que Rusia sea sancionada o suspenda las exportaciones de gas y petróleo a este continente y modelar las consecuencias de este suceso.

Nuestros objetivos incluyen el análisis de algunas de las siguientes posibles consecuencias directas o indirectas de la invasión y su correlación con las reservas de energía de Europa.

- Disminución de las exportaciones de gas y petróleo de Rusia a Europa
- La escasez de gas y petróleo en el mercado energético europeo y posibles soluciones
- Reinicio de negociaciones con Irán y Venezuela (u otros Proveedores) para suspender sanciones y que incrementen sus exportaciones de petróleo y gas
- Búsqueda de alternativas de energía renovable y la importación de LPG con sus respectivos retardos.

## III. HORIZONTE DE TIEMPO

Como muchas de las acciones para corregir el problema tienen retardos significativos (negociación de fuentes alternativas, construcción de oleoductos/gasoductos, construcción de plantas de energía alternativa), el horizonte de tiempo debe ser de 5 años a futuro y 1 año atrás, es decir desde el 2020 hasta el 2025, para poder comparar los niveles energéticos con datos anteriores. Se tomó una muestra de tiempo pequeña debido a los cambios de la reserva y consumo de energía que fluctúan de manera estacionaria los cuales son muy importantes para su análisis, además se pudo evidenciar que al realizar el modelo este se estabilizaba en un futuro y podía haber nuevas medidas que influyeran en este. La unidad de tiempo de modelación será de 1 mes. Solo se toma 1 año atrás puesto que el comportamiento de los años anteriores a 2019 no muestra variaciones muy significativas.

*Nota: El año inicio de nuestro modelo es 2021 debido a los datos disponibles.*

## IV. JUSTIFICACIÓN DEL USO DE LA DINÁMICA DE SISTEMAS

El problema puede analizarse desde el punto de vista de la dinámica de sistemas, pues un hecho específico (invasión) desencadena una serie de hechos relacionados entre sí (exportaciones, generación, petroquímica, renovables) con claras relaciones de causalidad entre ellos.

Es posible trabajar con flujos y niveles, pues consideraremos la necesidad de Gas y Petróleo (en KTOE: *Kilotons of Oil Equivalent*) como un Nivel, los flujos de entrada estarán dados por las importaciones, energías renovables, otras alternativas, y los de salida por el consumo en generación de energía eléctrica, calefacción, e industria petroquímica. Existen suficientes datos en la página de la Unión Europea para definir todas las variables del sistema.

Existen una serie de consecuencias relacionadas que no consideramos en el modelo por su complejidad, tales como: inflación, precio, protesta social, migración, armamentismo. Nos concentramos en el problema energético.

## V. DIAGRAMA CAUSAL

A continuación, el diagrama causal inicial. El archivo "Energia Causalidad Mod.mdl" anexo.

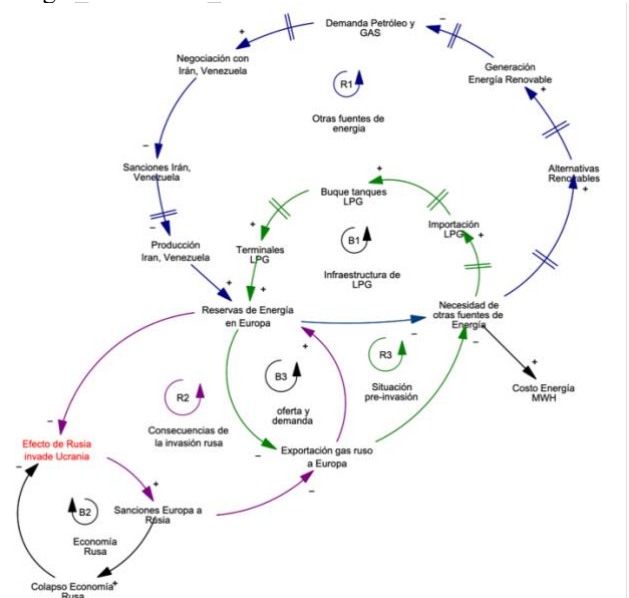


Fig 5. Diagrama causal

Variables utilizadas en el modelo de causalidad y sus ciclos para mejor comprensión.

- Reservas de Energía en Unión Europea: igual que en Flujos se refiere al nivel de almacenamiento de la reserva.
- Necesidad de otras fuentes de energía: representa la búsqueda de otras alternativas debido a escasez en las reservas por falta de exportaciones rusas.
- Importación LPG, Buques tanque, Terminales: es la cadena de importación de Gas Licuado, el cual requiere buques especializados para el transporte y terminales portuarias apropiadas para su descargue y transporte. Presenta múltiples retrasos y no será tenido en cuenta en el modelo de flujos y niveles.
- Alternativas renovables: indica la búsqueda de alternativas de energía renovable.
- Generación Energía Renovable: son las nuevas plantas de generación de energía renovable que entran en producción en el transcurso del tiempo.
- Demanda de Petróleo y Gas: disminuye en la medida que entren en operación las nuevas plantas de energía renovable.

- Negociación con Irán y Venezuela, Sanciones, Producción: cadena que representa una negociación para lograr importar petróleo y gas de estos países, hoy sancionados.
- Colapso economía rusa: como consecuencia de las sanciones. Se conecta con:
- Efecto de Rusia invade Ucrania: es el generador de las variables del modelo. En la medida que la UE logre reemplazar las importaciones rusas por otras fuentes, Rusia tendrá menor palanca de presión sobre Europa, y eventualmente se verá obligado a abandonar Ucrania para que le sean retiradas las sanciones y recuperar su economía.
- Costo energía: El incremento en los precios del gas, ocasiona el incremento del costo de energía, lo cual a su vez desencadena otros ciclos no incluidos en el modelo, y mencionados al principio de este informe.

#### Explicación de ciclos:

##### 1. R1 (Otras fuentes de energía):

Este ciclo comienza cuando las reservas de energía de Europa empiezan a decrecer y surge la necesidad de buscar otras fuentes como el uso de alternativas renovables que a largo plazo reducirán la demanda de petróleo y gas, sin embargo, cuando esta demanda aumenta se empiezan a buscar fuentes alternativas de petróleo y se comienzan a reducir las sanciones a países como Irán y Venezuela ricos en este recurso, posteriormente se podrían iniciar negociaciones con estos.

##### 2. R2 (Consecuencias de la invasión rusa):

En este ciclo se puede ver la repercusión que enfrenta el modelo por un ámbito social y económico, el cual no se analizará, pero se mostró para futuros análisis. La Unión Europea sanciona a Rusia por su ofensiva sobre Ucrania y los efectos que ha generado tal invasión, posteriormente debido a estas sanciones la UE restringe la importación de gas ruso, el cual se refleja en la variable exportación gas ruso a Europa, siguiendo estos hechos al limitar esta importación de gas las reservas de energía de UE disminuyen ya que Rusia es el mayor exportador de gas ruso y finalmente la disminución de las reservas son un efecto más de la invasión rusa.

##### 3. R3 (Situación pre-invasión) y B3 (oferta y demanda):

Estos ciclos representaban la dinámica de la energía en Europa a grandes rasgos antes de la invasión rusa a Ucrania. El segundo presenta un balance entre las exportaciones que Rusia le hace a Europa y como estas aumentan las reservas y en caso opuesto al disminuir las reservas se requieren más exportaciones por parte de Rusia de gas.

##### 4. B1 (Infraestructura de LPG):

Este ciclo de balance surge de la necesidad de buscar otras fuentes de energía por las bajas reservas de energía en Europa. Se buscan más importaciones de LPG para ser transportadas en buque tanques y posterior construcción de terminales para aumentar

las reservas, debido al largo proceso se presentan muchos retardos.

##### 5. B2 (Economía rusa):

Este ciclo se muestra en el diagrama causal, sin embargo, no será analizado en el diagrama de niveles y flujos porque no se indagará en la economía rusa. Este ciclo comienza con las sanciones que UE le hace a Rusia y por ende entre más es sancionado más afecta la economía rusa y posteriormente el efecto de Rusia sobre Ucrania disminuye por la crisis económica que se presentaría en el país.

#### VI. DIAGRAMA DE FLUJOS Y NIVELES

Es posible trabajar con flujos y niveles, pues consideraremos la necesidad de Gas y Petróleo (en unidades de energía KTOE) como un Nivel, y los flujos de entrada estarán dados por las importaciones de Rusia, energías renovables, otras alternativas, y los de salida por el consumo en generación de energía eléctrica, calefacción, gasolina y diésel, industria petroquímica. Existen suficientes datos en la página de la Unión Europea para definir todas las variables del sistema.

El siguiente es un modelo preliminar de Flujos y Niveles (Energia\_Flujos.mdl anexo)

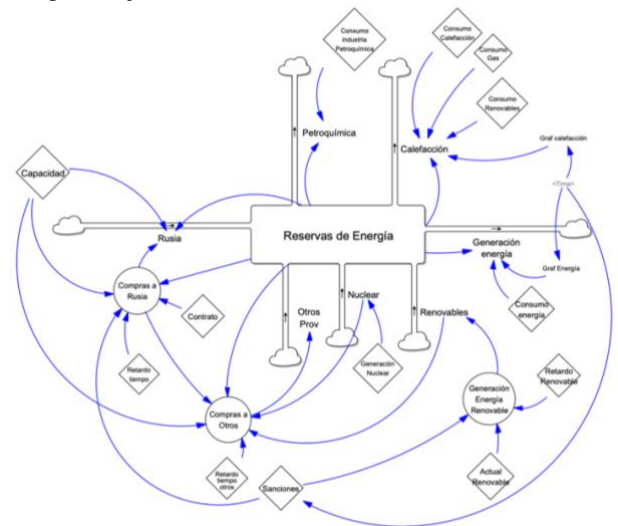


FIG 6. FLUJOS Y NIVELES

#### VII. FORMULACIÓN DEL MODELO

La unidad utilizada, KTOE (tonelada equivalente de petróleo) representa el valor de energía que rinda una tonelada de petróleo, la cual puede variar según los componentes que la constituyen. Generalmente equivale a 11.630.000 KWh, o a 6841 barriles de petróleo crudo. Un barril de petróleo crudo equivale a su vez a 170 metros cúbicos de gas natural [10]. Las equivalencias por lo tanto son:

$$1 \text{ KTOE} = 11.630.000 \text{ KWh} = 6841 \text{ Barriles de crudo} = 1.162.970 \text{ metros cúbicos de gas natural.}$$

- Supuestos: La necesidad de energía (en KTOE) es conocida, así como su factor de crecimiento anual.

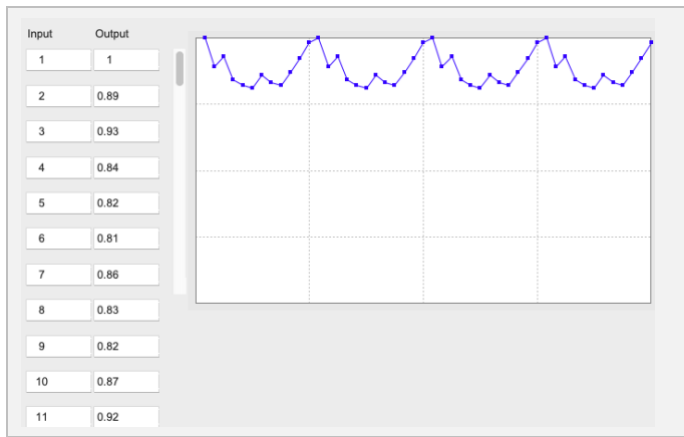
- Las entradas son conocidas: importaciones de Gas y Petróleo, generación de energías renovables y de energía nuclear.
- Las salidas son conocidas: consumo en generación de energía eléctrica, industria petroquímica (combustibles, agroquímicos)
- Los retardos son supuestos, basados en la información existente sobre cuanto se demora en construir una planta de energía renovable o formalizar un contrato.
- El modelo está en porcentajes en lugar de cifras absolutas. Así, el 100% de las fuentes de origen suplen el 100% de las necesidades, en el caso base (antes de la invasión a Ucrania). De esta forma, el modelo puede simular cualquier escenario real.

### VIII. VARIABLES Y ECUACIONES DEL MODELO

Para mayor facilidad y unicidad respecto a las unidades del modelo se decidió trabajar con porcentajes en algunas variables.

VARIABLES	ECUACIONES	UNID.
<b>NIVEL</b>		
Reservas de energía Europa	$Reserva(0) = 200$ $Reserva(t) = Reserva(t - 1) + Productos\ Rusos * dt + Nuclear * dt + Otrosproveedores * dt + Renovables * dt - Calefacción * dt - Generación\ Energía * dt - Petroquímica * dt$	KTOE
<b>FLUJOS</b>		
Productos rusos (gas y petróleo ruso)	$IF\ THEN\ ELSE(Capacidad > Reservas\ de\ Energía, Compras\ a\ Rusia, 0)$	$\frac{KTOE}{mes}$
Renovables	Generación Energía Renovable	KTOE/mes
Nuclear	Generación Nuclear	KTOE/mes
Otros proveedores	Compras a Otros	$\frac{KTOE}{mes}$
Generación de energía eléctrica	$IF\ THEN\ ELSE(Reservas\ de\ Energía > 0, Consumo\ energía\ KWh * Graf\ Energía, 0)$	$\frac{KTOE}{mes}$
Calefacción	$IF\ THEN\ ELSE(Reservas\ de\ Energía > 0, (Consumo\ Calefacción + Consumo\ Gas + Consumo\ Renovables) * Graf\ calefacción, 0)$	$\frac{KTOE}{mes}$
Petroquímica	Consumo industria petroquímica	KTOE/mes
<b>VARIABLES AUXILIARES</b>		
Compras Rusia	$IF\ THEN\ ELSE(Reservas\ de\ Energía < Capacidad, DELAY11(Contrato * (1 - Sanciones), Retardo, Contrato), Contrato)$	$\frac{KTOE}{mes}$
Generación Energía Renovable	$DELAY11(Actual\ Renovable + Actual\ Renovable * Sanciones, Retardo\ Renovable, Actual\ Renovable)$	$\frac{KTOE}{mes}$

Compras otros	$IF\ THEN\ ELSE(Reservas\ de\ Energía < Capacidad, IF\ THEN\ ELSE((100 - Compras\ a\ Rusia - Renovables - Nuclear) > 0, DELAY11(100 - Compras\ a\ Rusia - Renovables - Nuclear, Retardo\ tiempo\ otros, 23), 0), 0)$	$\frac{KTOE}{mes}$																								
<b>PARÁMETROS</b>																										
Sanciones	Time Fuente Parlamento Europeo[14]	1																								
<div style="display: flex; align-items: flex-start;"> <table border="1" style="margin-right: 10px;"> <thead> <tr> <th>Input</th> <th>Output</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>12</td><td>0</td></tr> <tr><td>13</td><td>0.3</td></tr> <tr><td>18</td><td>0.6</td></tr> <tr><td>25</td><td>0.9</td></tr> <tr><td>72</td><td>0.9</td></tr> </tbody> </table> </div>			Input	Output	1	0	12	0	13	0.3	18	0.6	25	0.9	72	0.9										
Input	Output																									
1	0																									
12	0																									
13	0.3																									
18	0.6																									
25	0.9																									
72	0.9																									
Contrato	46.8 basado en [12]	$\frac{KTOE}{mes}$																								
Retardo tiempo Otros	36	meses																								
Retardo tiempo Rusia	3	meses																								
Capacidad	500	KTOE																								
Actual renovable	17 basado en [12]	$\frac{KTOE}{mes}$																								
Retardo renovable	24 basado en [12]	mes																								
Generación Nuclear	13 basado en [12]	$\frac{KTOE}{mes}$																								
Consumo Calefacción	8 basado en [12]	$\frac{KTOE}{mes}$																								
Consumo Gas	22 basado en [12]	$\frac{KTOE}{mes}$																								
Consumo renovables	12 basado en [12]	$\frac{KTOE}{mes}$																								
Consumo energía eléctrica	23 basado en [12]	$\frac{KTOE}{mes}$																								
Consumo industria Petroquímica	35 basado en [12]	$\frac{KTOE}{mes}$																								
<b>Graf calefacción</b>	Time Basado en datos reales [13]																									
<div style="display: flex; align-items: flex-start;"> <table border="1" style="margin-right: 10px;"> <thead> <tr> <th>Input</th> <th>Output</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>0.6</td></tr> <tr><td>3</td><td>0.47</td></tr> <tr><td>4</td><td>0.33</td></tr> <tr><td>5</td><td>0.23</td></tr> <tr><td>6</td><td>0</td></tr> <tr><td>7</td><td>0</td></tr> <tr><td>8</td><td>0</td></tr> <tr><td>9</td><td>0</td></tr> <tr><td>10</td><td>0.18</td></tr> <tr><td>11</td><td>0.59</td></tr> </tbody> </table> </div>			Input	Output	1	1	2	0.6	3	0.47	4	0.33	5	0.23	6	0	7	0	8	0	9	0	10	0.18	11	0.59
Input	Output																									
1	1																									
2	0.6																									
3	0.47																									
4	0.33																									
5	0.23																									
6	0																									
7	0																									
8	0																									
9	0																									
10	0.18																									
11	0.59																									
<b>Graf Energía</b>	Time Basado en datos reales [11]																									



Ahora se explicará la formulación de cada variable:

1. **Reservas de Energía (KTOE):** Nivel que acumula la diferencia entre los ingresos y los egresos de energía por mes.
2. **Ingresos de Energía (flujos):**
  - a. Gas Ruso: Son las importaciones provenientes de Rusia, tanto de Gas como de Petróleo crudo.
  - b. Renovables: Porcentaje de generación de Energía renovable (Eólica, solar y otros) respecto a la energía total producida.
  - c. Nuclear: Porcentaje de generación de Energía Nuclear producida respecto a la energía total.
  - d. Otros Proveedores: Importación de Gas y Petróleo crudo de proveedores diferentes a Rusia
3. **Egresos de energía (flujos):**
  - a. Generación de Energía Eléctrica: Gas y Petróleo utilizado en plantas termoeléctricas. Está regulado por una gráfica que varía según los meses del año, pues el consumo es estacional.
  - b. Calefacción: Gas y Petróleo utilizado en calefacción. Regulado por una gráfica que varía entre los meses de invierno y verano, por su estacionalidad.
  - c. Petroquímica: Gas y Petróleo utilizado en la industria petroquímica, para producir gasolina, Diesel, abonos, plásticos y otros derivados del petróleo. Es constante en el tiempo.

Estas tres salidas se dan siempre y cuando existan reservas. De lo contrario, caen a cero hasta que las reservas se recuperen.

4. **Compras a Rusia:** Son variables y dependen de:
  - a. Contrato: indica el porcentaje de las necesidades de energía que se abastecen de importaciones desde Rusia, antes de la guerra.
  - b. Sanciones: Es una variable que puede modificarse en el transcurso del tiempo en porcentajes mensuales, e indica el porcentaje del contrato que puede utilizarse en un mes determinado.
  - c. Retardo: valor en meses que se demoran las sanciones en ser efectivas
  - d. Capacidad: Es un valor máximo de almacenamiento para las reservas de energía. Si se llega a dicho valor, se suspenden las compras.
5. **Compras a otros:** Son variables y dependen de:
  - a. Un valor mínimo del 25% de las necesidades de energía, más el volumen afectado por las sanciones

a Rusia, menos la generación de energía renovable y la energía nuclear. Esto es, el modelo reemplaza las sanciones a Rusia con importaciones de otros países, con una demora dada por el Retardo de tiempo.

6. **Renovables:** Energía renovable, variable en el tiempo. La generación de energía renovable se incrementa con base en las sanciones a las importaciones de Rusia. Esto es, a más sanciones, más inversión en energía renovable. Sin embargo, tienen un retardo para entrar en producción, el cual está controlado por la variable "Retardo Renovable".
7. **Nuclear:** Es constante, en el 13% actual. No hay planes de expansión.

## IX. RESULTADOS

Es posible simular diferentes escenarios, variando el nivel de sanciones aplicadas a Rusia, y la estacionalidad de los consumos de energía en Generación y Calefacción.

### 1. Caso Base

Llamamos Caso Base la situación antes de la guerra, cuando las reservas de energía estaban en punto de balance debido a las estaciones. La situación es la siguiente:

### Suministros de Energía:

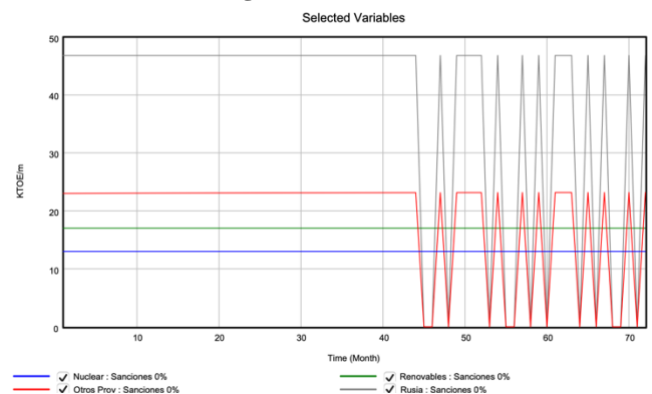


Fig 7. Fuentes de energía

Las necesidades de energía se suplen con un suministro constante por parte de Rusia (47%), Renovables (17%), Nuclear (13%) y otros proveedores (Noruega, Argelia, Nigeria, Estados Unidos... (23%). Debido a que los consumos son estacionales, las reservas comienzan a crecer hasta copar la capacidad y Rusia y Otros proveedores siguen enviando recursos hasta este evento. En esta simulación esto

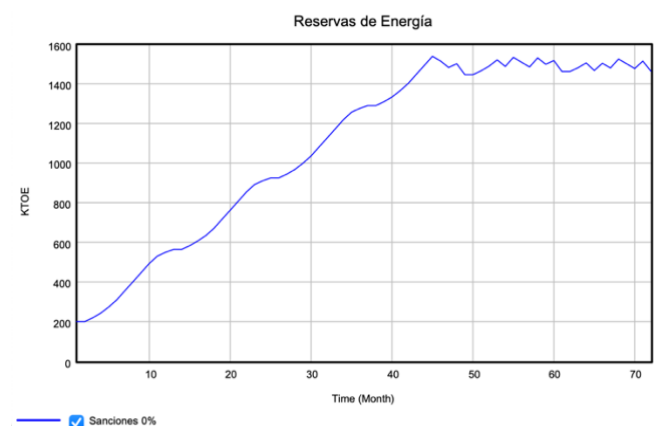


Fig. 8

sucede en el mes 45 por primera vez, lo cual hace que se suspendan las importaciones de Rusia y otros proveedores hasta que haya disponible nueva capacidad.

En esta simulación, tenemos la capacidad limitada a 1500 KTOE, lo cual equivale en el modelo a 15 meses de reservas.

## X. VALIDACIÓN

Para validar el modelo, se deben determinar cuáles son los límites y si son apropiados para el problema, verificar la consistencia de la estructura con el sistema real, ver que haya consistencia dimensional y que los parámetros tengan sentido en la vida real.

### Validación de estructura

#### Prueba teórica de la estructura del modelo:

Lo primero que se realizó fue una prueba teórica de la estructura del modelo, es decir se verificó que todas las ecuaciones y condicionales fueran lógicos. Esto se puede ver en Vensim cuando para cada variable, parámetro, nivel o flujo, el sistema dice que la ecuación es correcta según la estructura y las conexiones.

#### Consistencia dimensional:

Además, hicimos una prueba de consistencia dimensional. Esta prueba se realiza en cada paso del modelo porque al añadir nuevas variables o crear nuevas relaciones es necesario volver a verificar esta consistencia. Esta validación es importante para poder así explicar de manera correcta el significado de cada nivel, flujo o variable y Vensim también proporciona un chequeo dimensional que fue correcto hasta la última versión del modelo.

#### Prueba teórica de verificación de parámetros:

Para la prueba teórica de verificación de parámetros, la mayoría de ellos son basados en referencias bibliográficas obtenidas de Eurostat, que es donde se alojan las bases de datos de la Unión Europea. El modelo, como se mencionó anteriormente, se trabajó en su mayoría en porcentajes, lo cual permite una flexibilidad futura de las situaciones que se puedan presentar en el contexto de la invasión y las reservas de energía.

#### Pruebas condiciones extremas

Para verificar esto, se realizaron pruebas de condiciones extremas, pues ellas permiten identificar que las dimensiones sean correctas y que los valores de los distintos parámetros tengan sentido.

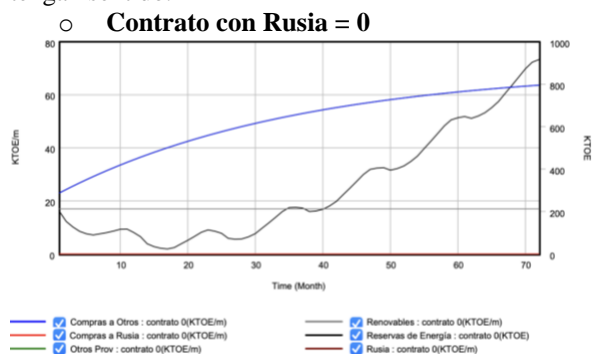


Fig 9. Rusia en ceros.

En este caso, el contrato con Rusia se redujo a 0. En el caso base es de  $46.8 \frac{KTOE}{mes}$  que implica que antes de la invasión esa era la cantidad negociada con Rusia y con otros países en términos de compras. Se ve que si no hay contrato las reservas llegan a niveles más bajos, pero como el porcentaje de la energía proveniente de compras a Rusia era casi la mitad, se entiende es lógico este comportamiento de reducción de las reservas. Las compras a otros tienen un incremento ya que suplen las compras que antes eran a Rusia.

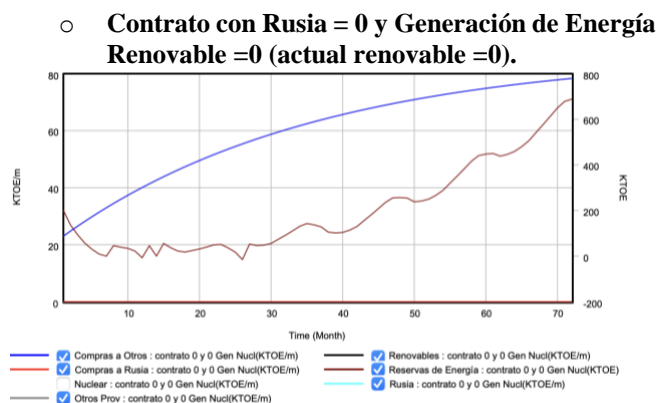


Fig 10. Rusia en cero y sin renovables

Con 0 generación de energía nuclear se evidencia también una reducción en los niveles, que de nuevo se comportan de forma oscilatoria pero más suave. La energía nuclear está dispuesta a 13 Ktoe/mes en el caso base, que no representa la totalidad de las reservas, sin embargo sí incide en el total de los niveles. La energía nuclear no está dada según un comportamiento estacional en el modelo y esto puede explicar las curvas más suaves. Además el contrato en 0 hace que las compras a otros sean más necesarias, lo cual es esperado. Finalmente, si los renovables se dejan en 0, vemos que las compras a otros son la única fuente de reservas, que es lo esperado.

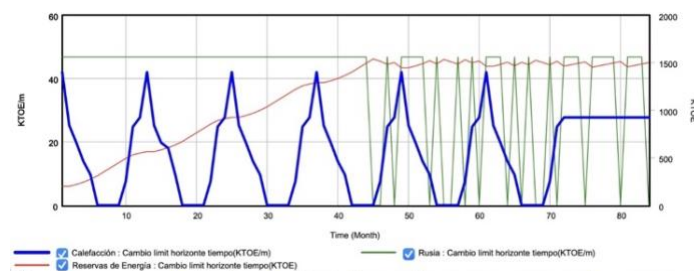


Fig 11

Además, cambiando el límite de tiempo a 84 meses (7 años), constatamos que el modelo se comporta de manera esperada, pues las gráficas de calefacción y energía eléctrica solo están definidas para 72 meses, lo que implica que, como se ve en la gráfica, después de ese tiempo las reservas oscilaran en función de la energía proveniente de Rusia, pues en este caso no se tenían sanciones definidas y la demanda de calefacción permaneció constante con el último dato asignado.

Recomendamos además utilizar el método de integración de Euler para el modelo pues con RK4 el modelo presenta un

error debido a algunos valores que aparecen a partir de la semana 44, así concluimos que el método de integración RK4 es muy complejo para el modelo.

## XI. POLÍTICAS

### Sanciones 30% Constantes

En este escenario suponemos unas sanciones a Rusia del 30% de sus exportaciones, lo cual corresponde a la realidad de este momento [14], y que permanecen en dicho nivel durante los próximos 5 años. Es importante anotar que, para incrementarlas, todos los países de la UE deben ponerse de acuerdo en su aprobación, lo cual no se ha dado hasta hoy.

Para efectos de la simulación, nuestro mes 1 es 1 año antes del inicio de la guerra. Por lo tanto, durante los primeros 12 meses de la simulación, el modelo se comporta como en el caso base. Las sanciones entran en efecto en el mes 13 y permanecen constantes hasta el mes 72 como se muestra en la gráfica de sanciones.

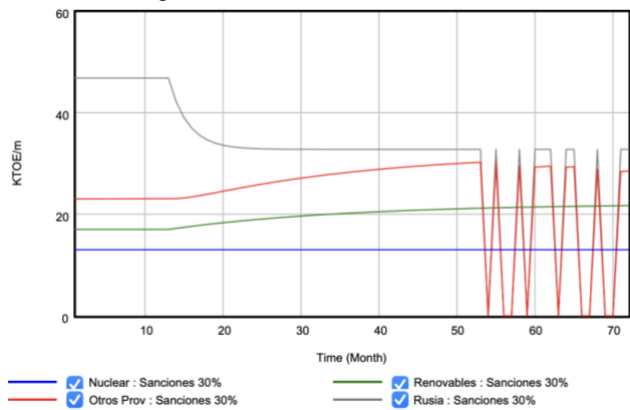


Fig. 12

Al entrar en efecto las sanciones en el mes 12, las importaciones de Rusia comienzan a disminuir gradualmente debido al retardo de 3 meses que tenemos en la simulación, pues suponemos que la disminución no es inmediata, debido a los contratos en camino. Al mismo tiempo, el faltante por las sanciones es reemplazado por las compras a otros proveedores, también con un retardo para la negociación y legalización de contratos.

Por último, la generación de energía renovable comienza a crecer, pues se aceleran los programas de inversión en dicho campo. La situación de las reservas no se altera, pues los contratos con terceros suplen los faltantes de Rusia:

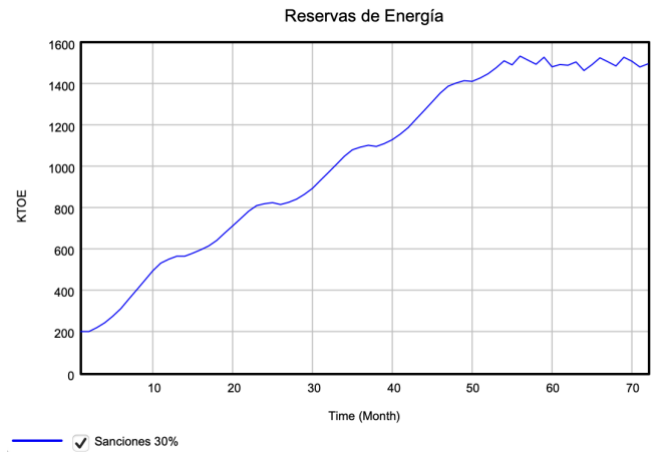


Fig. 13

Sin embargo, debido a los procesos que toma que otros proveedores aumenten la exportación a la Unión Europea la reserva va a demorarse alrededor de 45 meses para que alcance el 90% de su capacidad, esto equivale a 1350 KTOE.

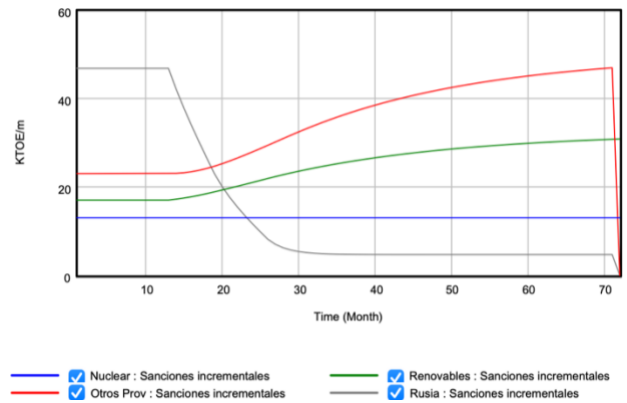


Fig. 14

### Sanciones Incrementales

Una segunda simulación, se hace con sanciones incrementales a Rusia, variando mes a mes, en cuyo caso se incrementan las compras a otros para suplir el faltante, con un retardo necesario para la negociación de otras fuentes. Además, la generación de energía renovable crece proporcionalmente a las sanciones a Rusia.

Como bien puede verse, las importaciones de Rusia (línea gris) descienden durante el mes 13 y 24 debido a las sanciones, y estas son reemplazadas por un incremento en las importaciones de Otros Proveedores (línea roja). Las Renovables por su parte (línea verde) crecen gradualmente, y en la medida en que suplen las necesidades de importación de otros proveedores, estas comienzan a disminuir.

Ahora bien, en el caso que las sanciones aumentan gradualmente durante el primer año de la invasión, las reservas de energía por su parte se ven seriamente afectadas por la situación, acá modelamos la situación de acuerdo con la función gráfica adjunta en la explicación de ecuaciones.

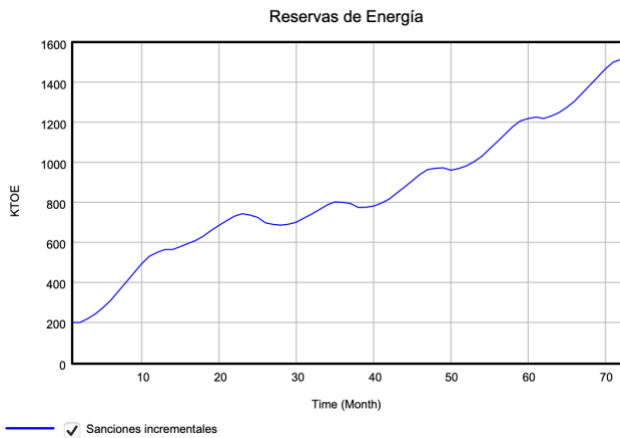


Fig. 15

Como vemos, en el caso base, que se evidencia el primer año, sin sanciones, las reservas tienden a crecer gradualmente, hasta el mes 13 cuando empiezan a imponerse las sanciones en un 30% hasta llegar a una capacidad máxima configurable en el modelo, pero en la simulación con sanciones a duras penas mantienen su nivel, como consecuencia de los retardos en la negociación de nuevos proveedores y en la puesta en marcha de nuevos proyectos de energías renovables y por eso se presentan las oscilaciones, tanto en función de los retardos como del porcentaje de sanciones impuestas y la estacionalidad del consumo tanto de energía eléctrica como de calefacción, evidenciadas en la sección VII.

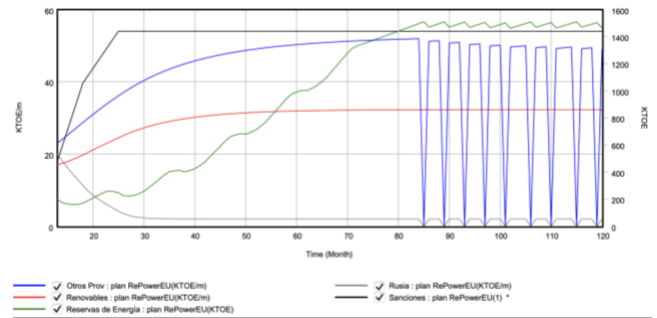
El análisis de estos diferentes escenarios nos muestran la gravedad de la situación energética de la Unión Europea y su enorme dependencia de Rusia. El gran problema en caso de incrementar las sanciones, es en lograr una negociación pronta de contratos de suministro con otros proveedores. Esto sin embargo tiene otros problemas, pues la mayoría de las importaciones de Rusia llegan por Gasoductos y Oleoductos, y las importaciones de terceros deberían llegar por barco, ocasionando demoras, pues los puertos europeos no están en capacidad de recibir un alto volumen de importaciones de petróleo líquido y de GNL.

### Plan RepowerEU

Este plan recientemente formulado por la Comisión Europea [9]. Plantea ser independiente de Rusia para el 2030. Aplicando al modelo algunas de las medidas que mencionan como: “diversificar el suministro de gas” buscando otros proveedores de manera más rápida y resolviendo situaciones que impiden que estos proveedores sean las fuentes principales del suministro de gas, así el tiempo de retardo de compras a otros se redujo de 36 meses a 24 meses y el contrato que se tenía con Rusia se sustituyó del 46.8% al 20%, además Rusia fue sancionada de manera incrementada como se muestra anteriormente, “acelerar la transición hacia una energía limpia”, por ende, el tiempo de retardo de producción de una fuente renovable alternativa se redujo a 24 meses (1 año), el consumo de gas para la calefacción pasó de ser del 22% al 14% y el consumo de energías renovables para el mismo uso pasó del 12% al 20%.

Con las políticas anteriormente mencionadas se puede observar que aproximadamente en un año las reservas comenzarían a llenarse nuevamente tras la crisis que debe pasar al tener poca reserva de energía debido al cambio de

proveedores del gas, también se puede analizar que la construcción de energías renovables tenderá a permanecer constante en el tiempo a menos que se implementen más medidas que las promuevan. Finalmente la reserva se logrará llenar y estabilizar con suministros provenientes de fuentes diferentes de Rusia aproximadamente en seis (mes 85) años. Esta información no toma en cuenta presupuesto ni datos reales del retraso de licitaciones para construcciones en la Unión Europea.



Simulación iniciada en el hoy, es decir, un año después del inicio del modelo.

Fig. 16

Vale recalcar que a partir del mes 85, cada 4 años, el suministro de Rusia ya no será necesario y si se desea este contrato podría terminarse por completo. Se puede concluir que casi 6 años tardaría la Unión Europea para ser independiente del gas ruso. (teniendo en cuenta el inicio del modelo 1 año atrás, es decir contando el tiempo desde hoy).

## XII. CONCLUSIONES

Es indudable la alta dependencia de la Unión Europea en las exportaciones de petróleo y gas de Rusia, situación agravada por la dificultad de reemplazarlas con otras fuentes, tanto por las demoras en dichas negociaciones con otros países productores, como por la carencia de infraestructura en puertos y oleoductos que permitan su reemplazo en el corto plazo. Sin duda, cualquier nivel de sanciones ocasionará un incremento en los precios de la energía, lo cual generará inflación en el corto plazo. En el largo plazo sin embargo, esta situación llevará a que la Unión Europea logre su independencia energética al incrementar la producción de energías renovables, a la mejora de su infraestructura en puertos para el descargue de GNL y a la construcción de nuevos gasoductos principalmente desde el norte de África y a través de España. Todo esto si restringe estrictamente a Rusia y se ve en la obligación de obtener nuevas fuentes de suministro. La Unión Europea deberá pasar años difíciles de abastecimiento energético y entrar en restricciones de ahorro para lograr independizarse de Rusia más rápido y evitando pasar un frío extremo en época de invierno. Será difícil pero a partir de 5 años si comienza hoy se verá el inicio de su autonomía energética.

Rusia por su parte, debería encontrar nuevos mercados, y seguramente China se convertirá en su principal cliente. Finalmente, un mundo más polarizado, en el cual el fantasma de la guerra, la inflación y el incremento del costo de vida será la realidad de los próximos años.

### XIII. TRABAJO FUTURO

El modelo logra describir a grandes rasgos una situación dinámica en cuanto a las reservas de energía que tiene la Unión Europea y cómo se verán afectadas por la invasión de Rusia a Ucrania. Eurostat y otras fuentes oficiales de información permiten la obtención de datos relativos a consumo y estacionalidad, sin embargo sería interesante que en el futuro no solo se considerara la reserva como el único nivel del modelo, sino también el precio de la energía, pues este también será dinámico debido a la contingencia. Además, se podría incluir el fenómeno social, como las protestas sociales a raíz de la invasión, dentro del modelo, pues esto también ejercerá una influencia en las decisiones sobre las sanciones y el contrato.

### REFERENCIAS

- [1] Grunau, Andrea; von Hein, Matthias; Theise, Eugen; Weber, Joscha (25 February 2022). "Fact check: Do Vladimir Putin's justifications for going to war against Ukraine add up?". Deutsche Welle. Retrieved 7 March 2022.  
*Única información disponible debido a fuentes oficiales censuradas.*
- [2] "Ukraine: civilian casualty update 1 June 2022", United Nations, 2022. [Online]. Available: <https://www.ohchr.org/en/news/2022/06/ukraine-civilian-casualty-update-1-june-2022>. [Accessed: 02- Jun- 2022].
- [3] Reals, T., & Sundby, A. (2022, March 23). Russia's war in Ukraine: How it came to this. CBS News - Breaking news, 24/7 live streaming news & top stories. <https://www.cbsnews.com/news/ukraine-news-russia-war-how-we-got-here/>
- [4] "Natural Gas Data", OPEC Annual Statistical Bulletin 2020, vol. 55, no. 1, pp. 76-83, 2022. Available: [https://www.opec.org/opec\\_web/static\\_files\\_project/media/download/s/publications/ASB\\_2020.pdf](https://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/download/s/publications/ASB_2020.pdf). [Accessed 1 June 2022].
- [5] From where do we import energy? Shedding light on energy in the EU. (n.d.). Retrieved June 1, 2022, from <https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy/bloc-2c.html#carouselControls?lang=en>
- [6] L. A. Peralta, "¿Qué pasaría si Rusia decide cortar el suministro de gas natural a Europa?", El País, 25 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible: [https://cincodias.elpais.com/cincodias/2022/02/24/mercados/1645696725\\_626860.html](https://cincodias.elpais.com/cincodias/2022/02/24/mercados/1645696725_626860.html)
- [7] "Rusia y Ucrania: cuánto depende el mundo del petróleo y el gas ruso (y cuál es la situación en América Latina)", BBC NewsMundo, 8 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-60653250>
- [8] BBC News. (2022, March 24). What sanctions are being imposed on Russia over Ukraine invasion? <https://www.bbc.com/news/world-europe-60125659>
- [9] European Commission, "REPowerEU: Joint European action for more affordable, secure and sustainable energy", 2022. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_22\\_1511](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_1511)
- [10] "equivalent ton of oil", Sociedad Nuclear Española. 2022. <https://www.sne.es/la-sne/>
- [15] VOANEWS, "Over 560 Ukraine National Guard Soldiers Killed in War, Kyiv Reports", 2022.

### REFERENCIAS DE LA INFORMACIÓN DEL MODELO

- [11] Eurostat, "Energy statistics - latest trends from monthly data", Eurostat, 2022.
- [12] "Shedding light on energy in the EU", Ec.europa.eu, 2022. [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy/img/pdf/shedding-light-in-the-EU-2022\\_en.pdf?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy/img/pdf/shedding-light-in-the-EU-2022_en.pdf?lang=en). [Accessed: 01- Jun- 2022].
- [13] Effects of individual metering and charging of heating and domestic hot water on energy consumption of buildings in temperate climates -

Scientific Figure on ResearchGate. Available from: [https://www.researchgate.net/figure/Calculated-monthly-energy-consumption-used-in-the-building-for-heating-and-DHW-and-HDD\\_fig3\\_325763219](https://www.researchgate.net/figure/Calculated-monthly-energy-consumption-used-in-the-building-for-heating-and-DHW-and-HDD_fig3_325763219) [accessed 3 Jun. 2022]

- [14] Press corner. European Commission - European Commission. (n.d.). Retrieved June 4, 2022, from [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/speech\\_22\\_2785](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/speech_22_2785)

### IMÁGENES

- Figura 1 Home - Eurostat. (2022). Retrieved 29 March 2022, from <https://ec.europa.eu/eurostat>
- Figura 2 Home - Eurostat. (2022). Retrieved 29 March 2022, from <https://ec.europa.eu/eurostat>
- Figura 3 Home - Eurostat. (2022). Retrieved 29 March 2022, from <https://ec.europa.eu/eurostat>
- Figura 4 L. A. Peralta, "¿Qué pasaría si Rusia decide cortar el suministro de gas natural a Europa?", El País, 25 de febrero de 2022. [En línea]. Disponible: [https://cincodias.elpais.com/cincodias/2022/02/24/mercados/1645696725\\_626860.html](https://cincodias.elpais.com/cincodias/2022/02/24/mercados/1645696725_626860.html)