

Crecimiento Económico y Dinámica de Sistemas Aprendizaje mediante Experimentación

Josefa RAMONI-PERAZZI

Escuela de Economía y Administración. Universidad Industrial de Santander.
Bucaramanga, 680003. Santander. Colombia.

Giampaolo ORLANDONI-MERLI

Facultad de Ciencias Exactas, Naturales y Agropecuarias - Universidad de Santander.
Bucaramanga, 680003. Santander. Colombia.

RESUMEN

La teoría clásica del crecimiento económico es un tema ampliamente analizado con un fuerte basamento matemático. Este trabajo plantea, como metodología educativa alternativa, enfocar su estudio mediante dinámica de sistemas, ofreciendo una visión más intuitiva y experimental que permite incorporar de manera gráfica las interrelaciones de *feedback* presentes en las estructuras que definen esos modelos. Se analizan algunas ideas clásicas de crecimiento económico, como las teorías de Adam Smith y de David Ricardo, plasmadas en sus respectivas obras, “La Riqueza de las Naciones” y “Principios de Economía Política”, construyendo así un laboratorio informático para realizar experimentos con modelos complejos en el campo de la economía. El principal producto es la construcción de un instrumento educativo para realizar experimentos de política económica, basándose en los principios de la dinámica de sistemas, utilizando software apropiado, como Powersim.

Palabras Clave: Crecimiento económico, Adam Smith, dinámica de sistemas.

1. INTRODUCCIÓN

La complejidad creciente de los fenómenos socio-económicos requiere disponer de metodologías y herramientas que permitan hacer análisis pertinentes conducentes a resultados que sean aplicables a la solución de problemas específicos. Los problemas de crecimiento económico ocupan un lugar prioritario en la temática socioeconómica, y han sido abordados bajo múltiples enfoques y filosofías. La escuela clásica ha generado un cuerpo coherente de teorías del crecimiento económico, siendo Adam Smith y David Ricardo los pioneros y principales exponentes. El método tradicional de análisis consiste en estudiar dicha problemática de manera rigurosa con instrumental teórico matemático, planteando modelos que logran explicar y predecir comportamientos empíricamente verificados. Ahora bien, los problemas relacionados con el crecimiento económico constituyen fenómenos altamente complejos, interrelacionados y con características de retroalimentación o *feedback*, cuyo análisis y solución requiere de metodologías y herramientas también más complejas e innovadoras. En este sentido la dinámica de sistemas ofrece enfoques complementarios que permiten analizar esos problemas de forma más intuitiva, utilizando un lenguaje de íconos que representan las variables del sistema, conectadas según determinada lógica y secuencia. Así, las relaciones teóricas abstractas y matemáticas se traducen en modelos gráficos, sustentados por ecuaciones diferenciales no lineales que permiten simular la dinámica de crecimiento en estudio. Se generan

diferentes trayectorias para los modelos planteados, mediante variaciones en las condiciones iniciales de las variables de estado de los modelos, y se hace análisis de sensibilidad sobre los parámetros relevantes de los sistemas definidos.

Los objetivos de este trabajo son: a) analizar la teoría clásica de crecimiento económico de Adam Smith y de David Ricardo bajo el enfoque de la dinámica de sistemas (DS), b) diseñar modelos de simulación de crecimiento económico según las directrices de dicha teoría, c) simular los modelos diseñados usando las técnicas de DS, generando trayectorias dinámicas para las variables de estado analizadas.

Los sistemas económicos pueden ser modelados como sistemas de ecuaciones diferenciales, que se resuelven utilizando métodos clásicos de solución analítica y numérica. La DS permite modelar estos sistemas económicos utilizando un lenguaje gráfico de programación donde los íconos representan variables de estado y variables de flujo, y ofrece además la posibilidad de resolver esos sistemas de ecuaciones por métodos numéricos tradicionales, incorporando además la simulación de los sistemas variando los parámetros que definen las ecuaciones del sistema, obteniéndose así las trayectorias dinámicas de las variables de estado involucradas en los análisis. Bajo este enfoque se formulan, analizan y simulan modelos que generan comportamientos dinámicos de las economías, reproduciendo teorías clásicas de crecimiento económico.

2. MÉTODOS

En este trabajo, se explica de qué manera la estructura de retroalimentación de un sistema genera su comportamiento dinámico mediante la metodología de DS. Para ello, se identifican y describen las fuerzas que surgen internamente en el sistema y que producen los cambios observados a lo largo del tiempo, explicando cómo se relacionan dichas fuerzas [1], [3], [5], [6]. La ciencia económica es una disciplina social de carácter lógico-empírico que describe, explica y predice fenómenos socioeconómicos, proporcionando a través de teorías económicas relaciones de causalidad entre variables relevantes, base para la construcción de modelos econométricos. Es necesario recordar que los sistemas socioeconómicos, por el continuo intercambio de entradas y salidas con el medio ambiente, son sistemas abiertos y disipativos por tener mecanismos de aliviadero que amortiguan sus respuestas ante los flujos de entrada. Son sistemas que incorporan estructuras de retroalimentación (*feedback*), ya que los mecanismos de pérdida surgen como consecuencia de esas estructuras de *feedback* negativo que dispersan los efectos de los inputs para mantener los estados del

sistema en sus niveles deseados. Son sistemas no lineales que presentan límites físicos y sociales que restringen el comportamiento de los individuos.

Representación y Solución de Modelos Económicos mediante Dinámica de Sistemas

La DS es una metodología de análisis que estudia de qué manera la estructura de retroalimentación de un sistema genera su comportamiento dinámico; es decir, trata de describir las fuerzas que surgen internamente en el sistema analizado para generar los cambios que en él se producen a lo largo del tiempo, y de qué forma se interrelacionan dichas fuerzas [1], [7]. La DS construye modelos para predecir efectos a largo plazo de decisiones alternativas: a) Observa el comportamiento del sistema real, identificando sus elementos fundamentales, b) Busca en el sistema las estructuras de retroalimentación que puedan explicar su comportamiento observado, c) Construye modelos matemáticos del comportamiento del sistema para poderlo simular en un computador, d) Valida, modifica y analiza el modelo, ante diferentes escenarios, d) Se concentra en las tasas de cambio de las diferentes magnitudes o niveles que intervienen en el sistema estudiado.

Modelaje mediante Dinámica de Sistemas

El proceso de modelaje según el enfoque de DS se centra en la visión global del problema en estudio, iniciando desde la conceptualización y culminando en los detalles de formulación de ecuaciones y pruebas del modelo. La esencia de la visión global se basa en dos supuestos interrelacionados: la búsqueda de objetivos del sistema, y su estructura de retroalimentación. La búsqueda de objetivos requiere la existencia de la estructura de retroalimentación, proceso circular en el que cualquier desviación de las condiciones actuales respecto de las condiciones deseadas estimula acciones para que tales condiciones regresen al estado deseado. Este punto de vista se denomina estructura interna de retroalimentación, reflejando la idea de que el comportamiento del sistema no es consecuencia de impactos externos, sino de la manera como la estructura de retroalimentación del sistema procesa dichos impactos [1], [7].

Los aspectos principales del enfoque de DS son: a) determinar los límites apropiados para decidir los elementos a incluir en el sistema en estudio, b) pensar en términos de relaciones tipo causa-efecto, c) centrarse en las relaciones de retroalimentación entre los componentes del sistema, d) considerar la estructura del sistema como una red causal de lazos de retroalimentación (*feedback loops*) que explica el comportamiento de los elementos del sistema a lo largo del tiempo. Hay dos tipos de lazos de retroalimentación en DS:

- Retroalimentación positiva: produce un efecto exponencial sobre una variable determinada; si comienza a variar, por el efecto exponencial, variará a una tasa cada vez más rápida. Si al aumentar la población total, aumenta el número de nacimientos, se produce un aumento mayor de la población y, a su vez, un aumento aún mayor en el número de nacimientos.
- Retroalimentación negativa: tiende a mantener al sistema bajo control, produciendo comportamientos estables luego de producirse alguna perturbación debido al principio de autorregulación. El aumento en la población total trae como consecuencia un incremento en la mortalidad, que lleva a una disminución en el nivel de la población y luego, con cierto retardo, se produce una disminución en la mortalidad;

esto se traduce en un posterior aumento poblacional, que lleva a un nuevo aumento en la mortalidad [1], [4], [5], [6].

Los modelos de DS se componen básicamente de variables y ecuaciones de nivel y de flujo:

- Variables de nivel o de estado. Representan el estado del sistema en un momento dado, y cuantifican la acumulación de recursos a lo largo del tiempo, como resultado de la diferencia acumulada entre los flujos de entrada y los flujos de salida para dicho nivel.
- Variables de flujo. Representan el flujo de material o energía desde o hacia un cierto nivel, determinando los cambios en dichas variables por unidad de tiempo.
- Ecuaciones de nivel. Relacionan una magnitud en el tiempo t con su valor en el periodo anterior $t-1$, y con su tasa de cambio, en el intervalo de cálculo dt . La expresión general de la ecuación es $Nivel_t = Nivel_{t-1} + dt \text{ Tasa}_{(t-1;t)}$. La ecuación del crecimiento poblacional es $Pob_t = Pob_{t-1} + dt(Nat - Mort)_{(t-1;t)}$.
- Ecuaciones de flujo. Representan la tasa de variación de las variables de nivel en cada unidad de tiempo, y definen el comportamiento del sistema [1], [5], [6], [7].

3. MODELOS Y EXPERIMENTOS

Modelando las ideas clásicas de crecimiento de Adam Smith, La riqueza de las Naciones

La espiral de acumulación que esboza Adam Smith en su monumental obra *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of the Nations*, escrita en 1776, centra su atención en la dinámica de la economía capitalista. Luego de estudiar las leyes del mercado de la economía, generando el concepto del mecanismo de la mano invisible por el cual el mercado se autorregula, centra su atención en la evolución de la economía a largo plazo, y para ello plantea dos leyes: ley de acumulación y ley de población [2]. “*What is it that drives society to this wonderful multiplication of wealth and riches? Partly it is the market mechanism itself...But there are more fundamental pressures behind the restless activity of the market. Smith sees two deep-seated laws of behavior, which propel the market system in an ascending spiral of productivity. The first of these is the Law of Accumulation.... the second great law of the system: the Law of Population*” [2, p.41].

Ley de acumulación

La actividad más importante del capitalista es la acumulación de los beneficios, que permite el incremento de fábricas y maquinarias, lo que a su vez incrementa la productividad del trabajo, generando un aumento aún mayor del producto y por tanto del consumo, mejorando así el bienestar de toda la sociedad (capitalistas y trabajadores). A medida que los beneficios de los capitalistas se reinvierten en fábricas y máquinas, y dado que la oferta de trabajo es finita, la competencia por dicha fuerza laboral presiona a los salarios al alza, lo que a su vez frena el crecimiento de los beneficios, y con ello se detiene la espiral de acumulación y por ende el crecimiento económico. El diagrama de la ley de acumulación muestra este comportamiento y se compone de dos estructuras de feedback: el lazo positivo superior que representa el proceso de acumulación de beneficios; el lazo negativo inferior, según el cual la acumulación de beneficios crea las condiciones que frenan una mayor acumulación “*accumulation would lead to a situation where further accumulation would be impossible. For accumulation meant more machinery and more*

machinery meant more demand for workmen. And this in turn would sooner or later lead to higher and higher wages, until profits—the source of accumulation—were eaten away” [2, p.42] (figura 1, Ley de acumulación).

Ley de población

Las fuerzas del mercado laboral regulan la cantidad de trabajo disponible a través de la interacción oferta y demanda: a mayores salarios se generan condiciones para más producción y bienestar,

y se ofrece más trabajo, debido a la reducción de la mortalidad infantil. Al incrementarse la fuerza laboral, se reduce la presión alcista de los salarios, permitiendo que actúe, con un cierto retardo, el proceso con feedback positivo, fortaleciendo así la espiral de acumulación. El retardo en la creación de fuerza laboral, luego de reducir la mortalidad infantil, causa desaceleración en el proceso de crecimiento económico, generando recesiones periódicas en la economía (figura 1, Ley de población).

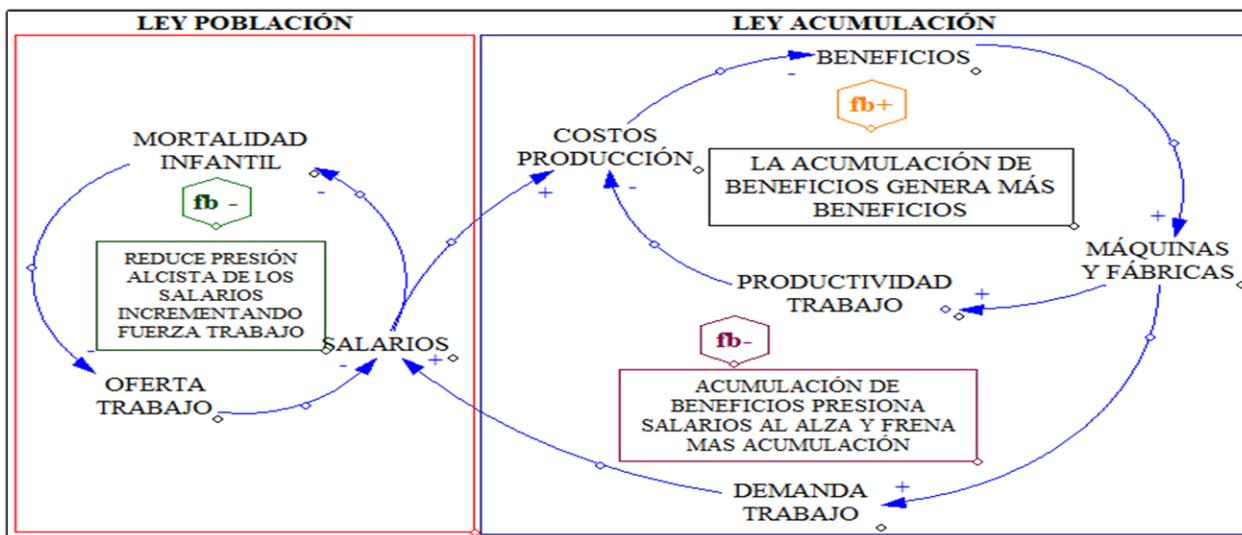


Figura 1. Ley de población y ley de acumulación. Modelo de crecimiento económico de A. Smith. Fuente. Elaboración propia, basado en R. Heilbroner y B. Richmond

Análisis de la dinámica del sistema de crecimiento clásico

- Estructura que representa el proceso de feedback positivo: El beneficio del sistema acumula la diferencia entre ingresos, generados por la compra de bienes, y los gastos, causados por el pago de salarios y reinversiones de los beneficios en nuevas maquinarias, acumuladas en un stock de máquinas que incrementan la productividad del trabajo y permiten el aumento en la demanda de trabajadores. El resultado es un incremento de producción, acumulado en el inventario de bienes, el cual se va reduciendo por el aumento de la demanda y posterior venta. Los salarios se regulan por la relación entre oferta y demanda por trabajo, que se asume disponible sin restricciones; además, los precios de los bienes se asumen constantes.
- Estado estacionario (steady state): Los ingresos se distribuyen en pagos de salarios y en inversiones, por lo que los beneficios no crecen; el stock de maquinaria es constante (la inversión en nuevas máquinas se produce a una tasa equivalente al retiro de maquinaria depreciada y obsoleta); significa que no hay avance tecnológico y la productividad del trabajo es constante, lo que conduce a un stock constante de trabajo igual al trabajo deseado. La producción es constante e igual a la demanda. Los inventarios no varían y la economía está en un estado de equilibrio perfectamente balanceado.

Simulación y experimentación con el modelo de crecimiento de Adam Smith

La figura 1 muestra el mapa de relaciones causales que definen el sistema de crecimiento económico de Adam Smith. Como se observa, el sistema queda conformado por dos lazos de feedback

negativos y un lazo positivo. La figura A1_1 del anexo muestra el modelo de crecimiento económico expresado en el lenguaje de DS (software Powersim); el modelo contiene todas las relaciones matemáticas, ecuaciones y valores de parámetros que definen el sistema previamente especificado; estas ecuaciones se muestran en la figura A1_2.

Experimentos con el modelo Dinámica de Sistemas

Partiendo del modelo básico que reproduce las condiciones del estado estacionario, se han planteado algunos experimentos que permiten observar el funcionamiento del modelo diseñado y la respuesta de las principales variables que lo definen. La tabla 1 resume las características de los experimentos realizados.

Tabla 1. Experimentos con modelo económico de crecimiento

Experimento	Descripción
1	Reducción puntual de salarios en el periodo t
2	Relación entre productividad y maquinaria
3	Incorporación de restricciones en la fuerza laboral
4	Reducción en mortalidad infantil
5	La ley de hierro de los salarios (David Ricardo)

Experimento1: Reducción de salarios

Partiendo del estado estacionario, con la función $PULSE(SALARIOS*0,30;10;100)$ en $t=10$, se introduce un shock en el sistema económico, expresado como una reducción de los salarios. Esta reducción activa la espiral de acumulación capitalista pues, al reducir costos, los beneficios comienzan a crecer, incrementándose la inversión en maquinaria, aumentando la productividad del trabajo y, con cierto retardo, los salarios de

los trabajadores; el crecimiento de la economía genera mejoras en el bienestar de capitalistas y trabajadores a largo plazo. La

figura 2 muestra las relaciones y trayectorias de las principales variables.

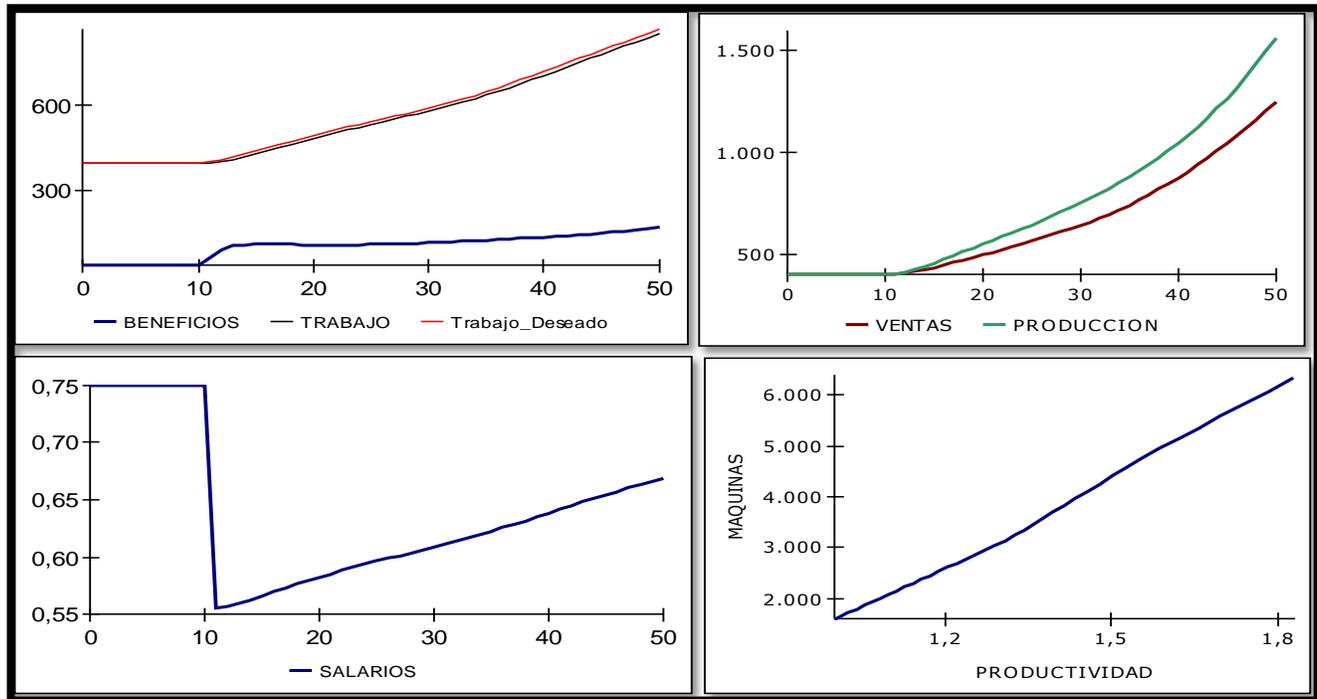


Figura 2. Experimento 1. Reducción de Salario. Fuente. Elaboración propia. Software Powersim Studio.

Experimento 2: Modificación de la estructura de producción

Hasta este momento la relación empírica entre productividad y maquinaria se ha supuesto que es de tipo directa y lineal, como se indica en la figura A1 del anexo. Este segundo experimento modifica esa relación lineal y establece una relación exponencial entre ambas variables. Los resultados se muestran en la siguiente figura 3. La demanda creciente por fuerza laboral, como resultado del incremento en el stock de máquinas, compite contra la demanda creciente por trabajo, resultado de los incrementos en productividad de la fuerza laboral. Como consecuencia de la mejora en productividad, la demanda laboral comienza a declinar, lo que conduce a una reducción de salarios. El beneficio capitalista aumenta, pero el beneficio laboral disminuye.

La reinversión de beneficios en capital crea un mayor incremento en stock de capital que desplaza aún más la fuerza laboral. Este resultado ilustra cómo la simulación con DS, mediante la modificación de relaciones empíricas, genera trayectorias no anticipadas por el análisis matemático. Al modificar la relación lineal Productividad-Maquinaria a una relación exponencial, tanto la fuerza laboral como los salarios decrecen, por lo que el trabajador no participa en la espiral de acumulación capitalista. Los beneficios van creciendo y se reinvierten en más capital en lugar de trabajo, haciendo la economía capital-intensiva. Ese es el camino que ha seguido la economía de los Estados Unidos y otros países desarrollados; la fuerza laboral ha migrado del sector agrícola-industrial al sector de servicios; la automatización ha desplazado la fuerza laboral al sector de servicios.

Experimento 3: Introducción de restricciones en la fuerza laboral

Esta restricción está expresada como un volumen finito de oferta de trabajo, modelada mediante un stock de fuerza laboral, que ofrece y recibe trabajo. La figura A2 del anexo muestra la modificación hecha al modelo inicial en equilibrio, incorporando la restricción indicada. El efecto de imponer una restricción en la oferta laboral es generar una desaceleración en el crecimiento económico, debido al freno que a su vez se impone a la espiral de acumulación de beneficios.

En la figura 4 se muestra el efecto sobre beneficios, trabajo y productividad de esta restricción. La expansión económica previamente observada se frena, al chocar con esta restricción impuesta en la fuerza laboral, corroborando la explicación intuitiva de Smith. El resultado de este experimento muestra la capacidad de la DS para descubrir comportamientos insospechados, ya sea por intuición o por la solución de las ecuaciones diferenciales que definen el modelo. La simulación de este experimento muestra el surgimiento de un ciclo estacionario, en el sentido de que la economía, aún frenada en su capacidad de crecer por la restricción en la fuerza laboral, trata de despegar. Este movimiento cíclico estacionario, de alguna manera está alimentado por fluctuaciones salariales, que a su vez reflejan las oscilaciones de los beneficios, reinvertidos en capital.

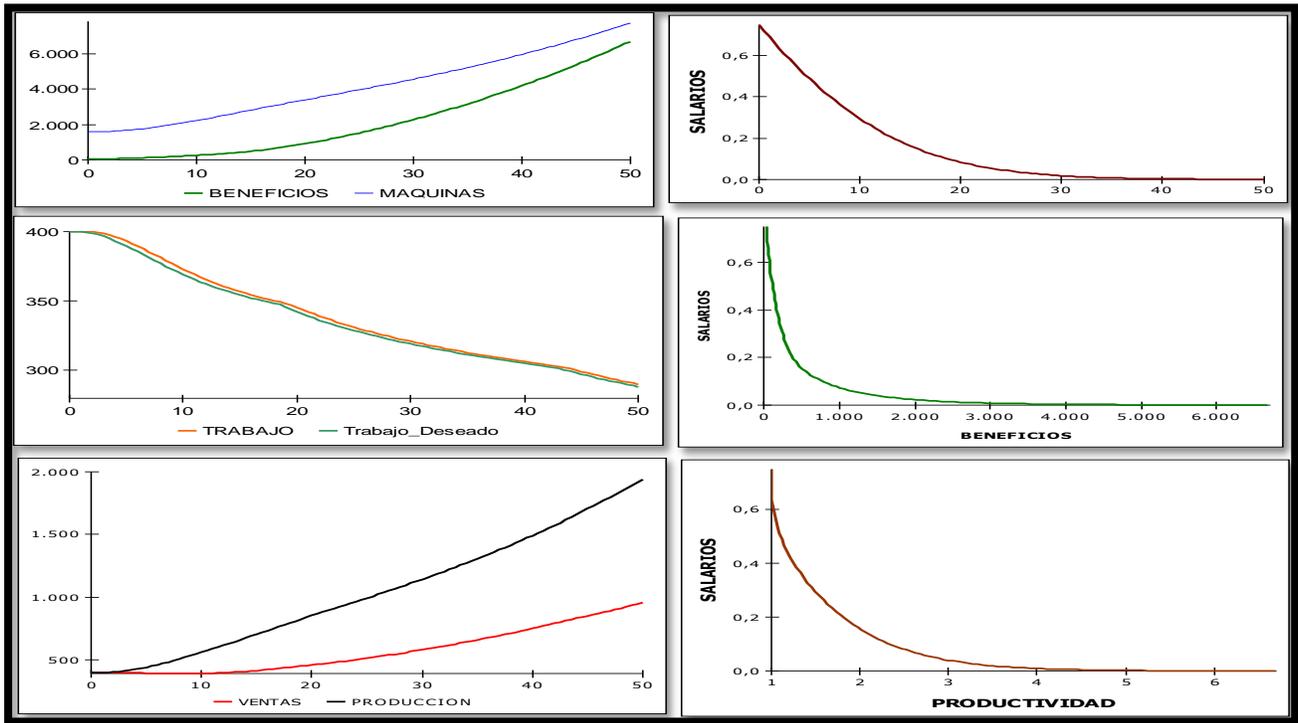


Figura 3. Experimento 2. Productividad exponencial Fuente. Elaboración propia. Software Powersim Studio

Como la fuerza laboral está restringida a un nivel de pleno empleo, aun cuando el trabajo deseado sea menor que el nivel de trabajo real, éste no se ajusta a niveles inferiores. La variable “cambio en trabajo” se anula en el momento en que se alcanza el pleno empleo, con lo que el trabajo no se ajusta a las variaciones en trabajo deseado, la oferta laboral a largo plazo, reduciendo la restricción impuesta originalmente.

laboral, corroborando la explicación intuitiva de Smith. El resultado de este experimento muestra la capacidad de la DS para descubrir comportamientos insospechados, ya sea por intuición o por la solución de las ecuaciones diferenciales que definen el modelo.

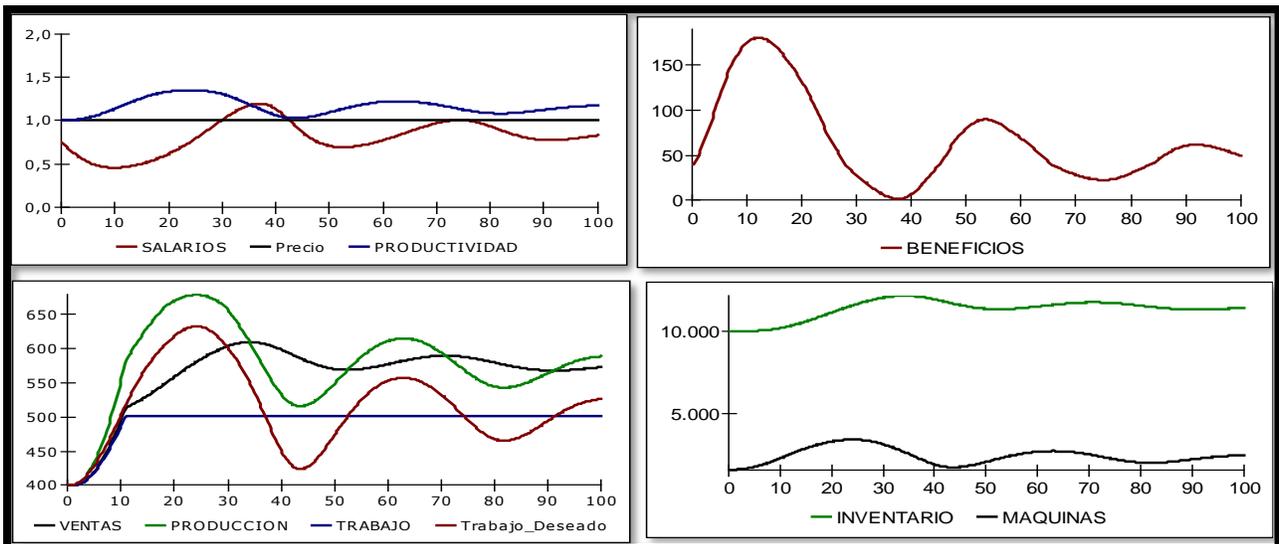


Figura 4. Experimento 3. Restricción laboral. Fuente. Elaboración propia. Software Powersim Studio.

Experimento 4: Reducción en la mortalidad infantil
 Cuando la oferta de fuerza laboral es escasa, los salarios aumentan, lo que mejora el estándar de vida de los trabajadores,

reduciendo la mortalidad infantil, y esto permite el incremento de la oferta laboral con determinado retardo. Al salir del estado de equilibrio, la economía capitalista queda sujeta a crecimiento con

ciclos, presentando recesiones periódicas. Estas recesiones surgen debido a elevados niveles de salarios, resultado de escasez en la oferta laboral; ello causa reducción de los beneficios y caída de las inversiones en capital, con la consecuente reducción en el crecimiento de la productividad, desembocando en recesión. La consecuencia de este hecho es un ajuste a la baja en los salarios, como respuesta al incremento en la fuerza laboral, resultado de la reducción en la mortalidad infantil que previamente se produjo por los altos salarios alcanzados. Se genera así un tipo de crecimiento económico sostenible, pero acompañado de recesiones periódicas. La figura A3 del anexo muestra el esquema gráfico de DS; la figura 5 muestra la evolución de las principales variables del modelo.

Experimento 5: Ley de hierro de los salarios

En 1817 David Ricardo publica “Principles of Political Economy”, obra en la que enuncia la ley de hierro de los salarios, según la cual “el salario siempre tenderá a reducirse a lo estrictamente necesario permitiendo al asalariado solamente subsistir y reproducirse”. Así, si el salario sube demasiado, la población aumentará y al haber mayor oferta laboral, los salarios bajarán; al contrario, si los salarios son demasiado bajos, la población disminuirá, causando escasez de mano de obra y consecuente aumento en los salarios. A las dos clases sociales reconocidas por Smith, trabajadores y capitalistas, David Ricardo incorpora una tercera clase social, los terratenientes,

“Ricardo believed that the only class that could possibly benefit from the progress of society was the landlord, unless his hold on the price of grain was broken; the economic world was constantly tending to expand. Therefore, the demand for laborers increased. This boosted wages, but only temporarily. As population expanded, it would become necessary to push the margin of cultivation out further. More mouths would demand more grain, and more grain would demand more fields. And quite naturally, the new fields put into seed would not be so productive as those already in use. This lower productivity translates into higher production costs, passed along to consumers as higher prices” [2, p53-55].

Hay dos fuerzas que impulsan las transferencias de riquezas: el crecimiento de la población y la productividad marginal decreciente de la tierra de cultivo; esto asegura una escalada permanente en costos de producción, precios y salarios. Y estos dos fenómenos pueden detener la espiral de crecimiento y acumulación capitalista. La única manera de mantener la expansión capitalista es que el crecimiento de la población venga acompañado por un incremento en puestos de trabajo, resultado de mayores niveles de inversión; de la misma forma, un incremento en salarios, causado por incremento en los precios de los alimentos, debe compensarse por un aumento en precios, con lo que la espiral de acumulación capitalista de Adam Smith no se detiene.

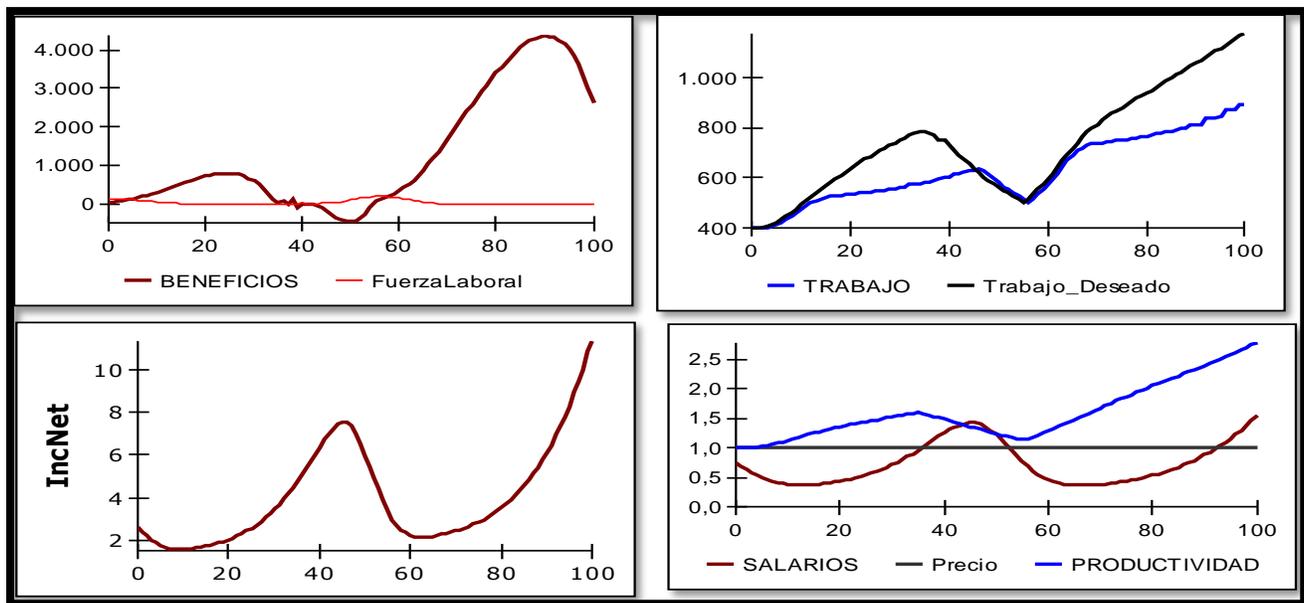


Figura 5. Experimento 4. Reducción mortalidad infantil Fuente. Elaboración propia. Software Powersim Studio

4. CONCLUSIONES

El modelamiento de las estructuras económicas mediante DS permite comprender, explicar y simular la trayectoria de las principales variables a lo largo del tiempo, y también probar diferentes políticas económicas mediante la definición de escenarios específicos. En este trabajo se ha presentado una parte de la teoría clásica de crecimiento económico contenida en la obra de Adam Smith, interpretada bajo el lente de la DS. Luego de formular y simular el modelo básico, se ha sometido a diversos experimentos para probar algunas hipótesis formuladas por su

autor. Se ha probado el impacto sobre el modelo del cambio en el valor de cierto parámetro en un momento del tiempo, como se muestra en el experimento 1, utilizando para ello la función pulso. También se ha hecho análisis de sensibilidad para ver el comportamiento del modelo ante cambios en las relaciones empíricas establecidas, o modificaciones en los valores de los parámetros iniciales que definen el modelo, como es el caso del experimento 2, donde se analiza el efecto que tiene sobre las variables del modelo, el cambio de la relación Productividad_Máquina, de función lineal a exponencial. En el experimento 3 se muestra cómo restricciones en fuerza laboral

pueden frenar el crecimiento económico. La economía tiene mecanismos que pueden causar movimientos cíclicos sin necesidad de que crezca la oferta laboral, lo que según AS era necesario para generar dichos ciclos. El espíritu de libre mercado con el cual Smith concibe la economía capitalista plantea que el sistema tiene su propio remedio si se deja actuar libremente. Cuando la oferta laboral está fija o limitada y hay competencia entre los capitalistas por incrementar la producción y por tanto demandan trabajo, entonces los salarios se incrementan, lo que causa una mejora en el bienestar de los trabajadores; esto para Smith es fundamental para reducir la mortalidad infantil, lo que va a fortalecer y aumentar la oferta laboral a largo plazo. En el experimento 4 se prueba la hipótesis de que, al reducirse la mortalidad infantil por mejoramiento en los salarios pagados, a largo plazo se genera crecimiento sostenible con recesiones periódicas. En definitiva, se ha mostrado la capacidad de la DS para representar y modelar teorías relativamente complejas, debido a las estructuras de feedback que ellas incorporan; esto permite analizar de manera mucho más intuitiva las relaciones de causa-efecto contenidas en los modelos matemáticos de crecimiento económico, y también de experimentar con esos modelos enfatizando los aspectos conceptuales y lógicos, pues los métodos numéricos requeridos para estudiar dichos modelos, generalmente expresados como sistemas de ecuaciones diferenciales no lineales, están incorporados en el software utilizado para tal fin, como es el Powersim.

5. REFERENCIAS

- [1] J. Forrester. **Principle of Systems**, Lexington, Mass., 1961.
- [2] R. Heilbroner. **The Worldly Philosophers**, 7th Ed. New York. 1998.
- [3] P. Nijkamp and A. Reggiani. **Interaction, Evolution and Chaos in Space**, Springer-Verlag, 1992.
- [4] G. Orlandoni. “Análisis Dinámico de Poblaciones Biológicas mediante Dinámica de Sistemas”. **Revista Economía**, Universidad de Los Andes, No. 13, 1997, pp. 115-146.
- [5] G. Orlandoni y J. Ramoni.” Ecuaciones Diferenciales de la Física Clásica. Interpretación y Solución mediante Dinámica de Sistemas”. **Revista Ingenierías**, Universidad Industrial Santander, 2018. Doi.org/10.18273/revuin.v17n1-2018005.
- [6] G. Orlandoni y J. Ramoni. “Análisis y Simulación de Modelos Económicos Complejos mediante el Enfoque de Dinámica de Sistemas”. **Memorias CICIC**, ISBN-Vol I: 978-1-941763-72-8 (Print). 2018.
- [7] G. Richardson. “Loop Polarity, Loop Dominance and the Concept of Dominant Polarity”. **System Dynamics Review**, Wiley and Sons, Vol. 11, No. 1, 1995.
- [8] Powersim, Powersim Studio 10. 2017.
- [9] Richmond, B. 1985. **Users Guide to Stella**, HPS, New Hampshire.
- [10] M. Radzicki y J. Sterman. **Evolutionary economics and system dynamics**. England R (ed), Evolutionary concepts in contemporary economics. University of Michigan Press. 1994.
- [11] G. Orlandoni y J. Ramoni. Modelos económicos y sistemas caóticos: Estudio mediante dinámica de sistema. En: **Métodos numéricos y sus aplicaciones**. XI CCMN. ISBN: 978-958-48-5477-3. Universidad Industrial Santander. Bucaramanga. 2018.

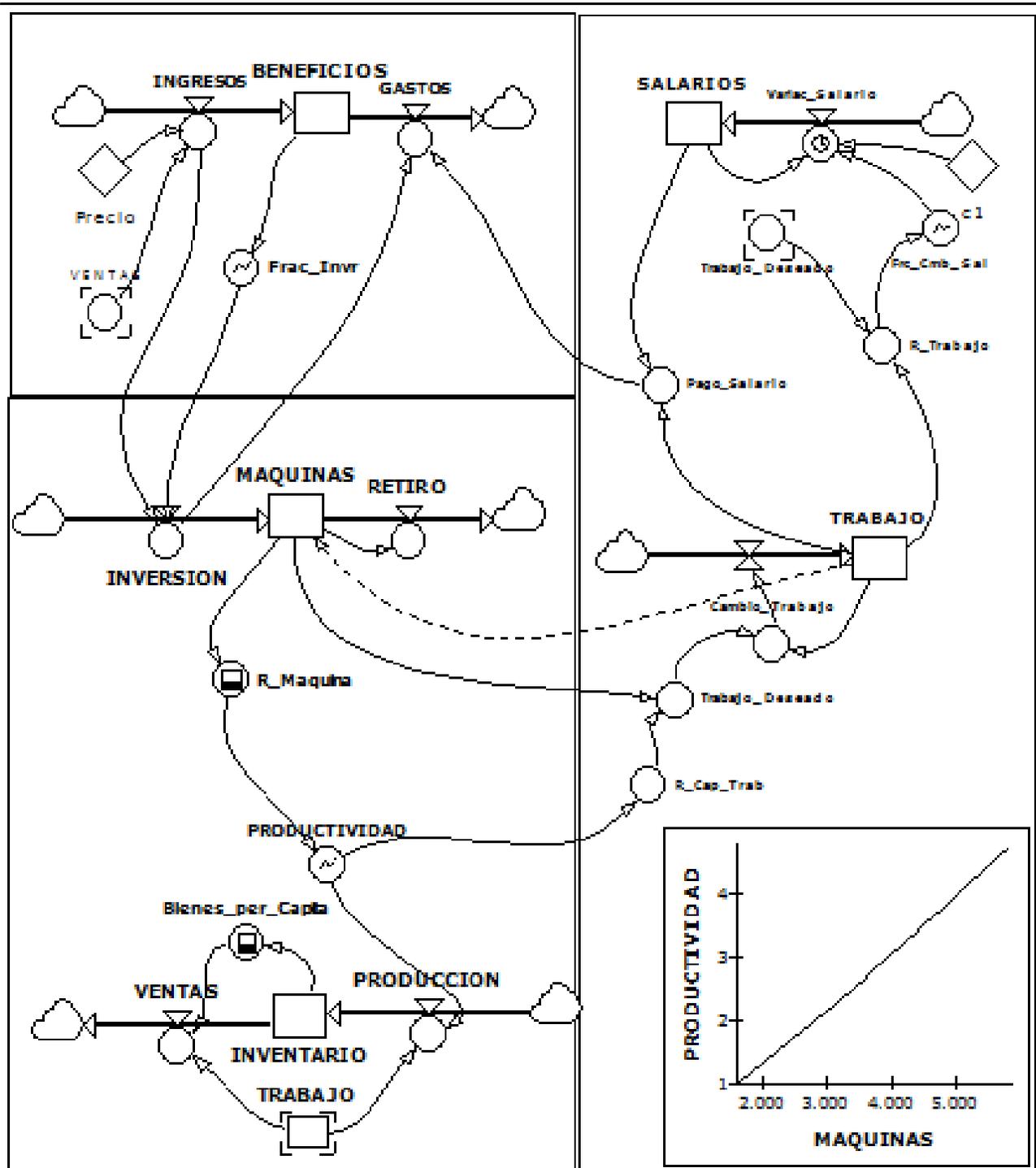


Figura A1_1. Modelo de crecimiento económico de A. Smith. Relaciones entre variables según DS
Fuente. Elaboración propia según R. Heilbroner y B. Richmond. Powersim Studio.

Name	Definition
BENEFICIOS	40
GASTOS.out	GASTOS
INGRESOS.in	INGRESOS
Bienes_per_Capita	(INVENTARIO/INIT(INVENTARIO))*1
c1	1
Cambio_Trabajo	(Trabajo_Deseado-TRABAJO)/1
Frac_Invr	GRAPH(BENEFICIOS,0,40,{0,0.25,0.37,0.445,0.52,0.58,0.625,0.655,0.675,0.69,0.705//Min:0;Max:0.8//})
Frc_Cmb_Sal	GRAPHCURVE(R_Trabajo,0,0.2,{0.25,0.18,0.133,0.09,0.05,0,-0.0675,-0.12,-0.172,-0.212,-0.25//Min:-0.25;Max:0.25//})
GASTOS	INVERSION+Pago_Salario
INGRESOS	Precio*VENTAS
INVENTARIO	10000
PRODUCCION.in	PRODUCCION
VENTAS.out	VENTAS
INVERSION	INGRESOS*Frac_Invr
MAQUINAS	4*TRABAJO
INVERSION.in	INVERSION
RETIRO.out	RETIRO
Pago_Salario	TRABAJO*SALARIOS
Precio	1
PRODUCCION	TRABAJO*PRODUCTIVIDAD
PRODUCTIVIDAD	GRAPH(R_Maquina,0,1,{0,1,2.32,3.80,5.30,7.0,8.80,11.3,13.60,16.0,19.7//Min:0.5;Max:20//})
R_Cap_Trab	4*PRODUCTIVIDAD
R_Maquina	MAQUINAS/INIT(MAQUINAS)
R_Trabajo	TRABAJO/Trabajo_Deseado
RETIRO	MAQUINAS/16
SALARIOS	0.75
Variac_Salario.in	Variac_Salario
TRABAJO	400
Cambio_Trabajo.in	Cambio_Trabajo
Trabajo_Deseado	MAQUINAS/R_Cap_Trab
Variac_Salario	SALARIOS*Frc_Cmb_Sal-c1*PULSE(SALARIOS*.25, 3, 100)
VENTAS	TRABAJO*Bienes_per_Capita

Figura A1_2. Ecuaciones del modelo de crecimiento económico de A. Smith.

Fuente. Elaboración propia. Powersim Studio

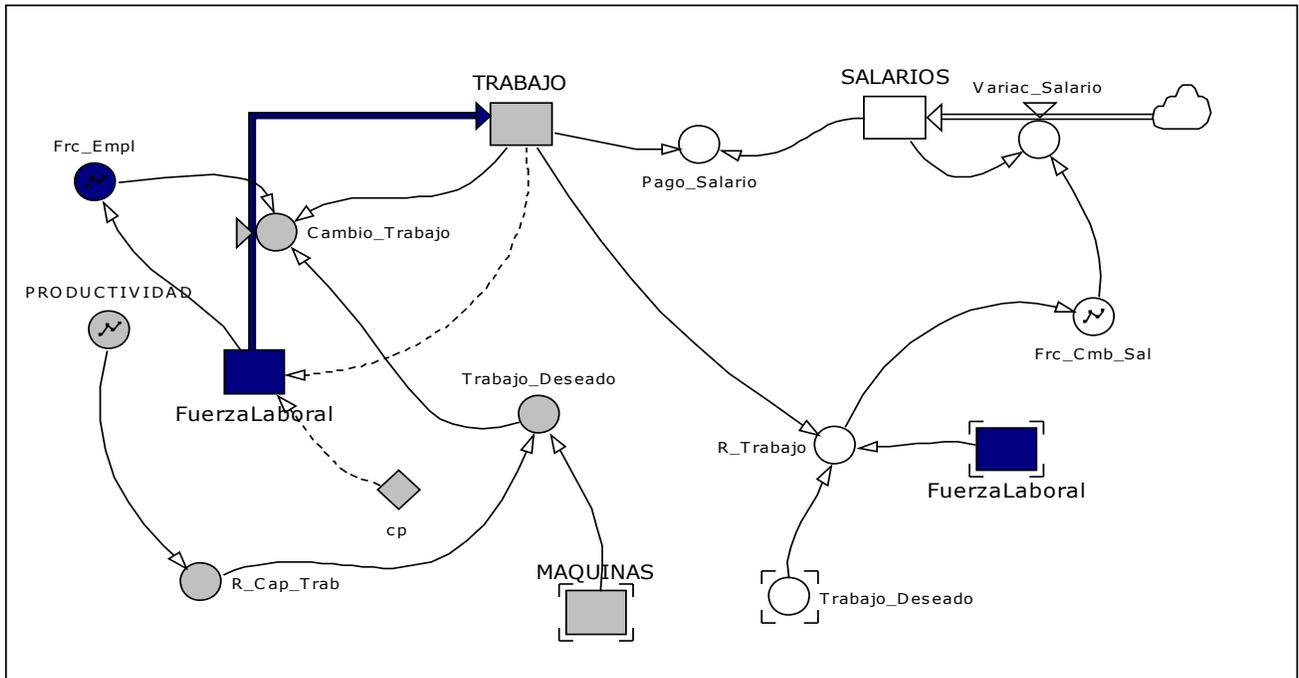


Figura A2. Experimento 3. Restricción en fuerza laboral. Fuente. Elaboración propia. Powersim Studio

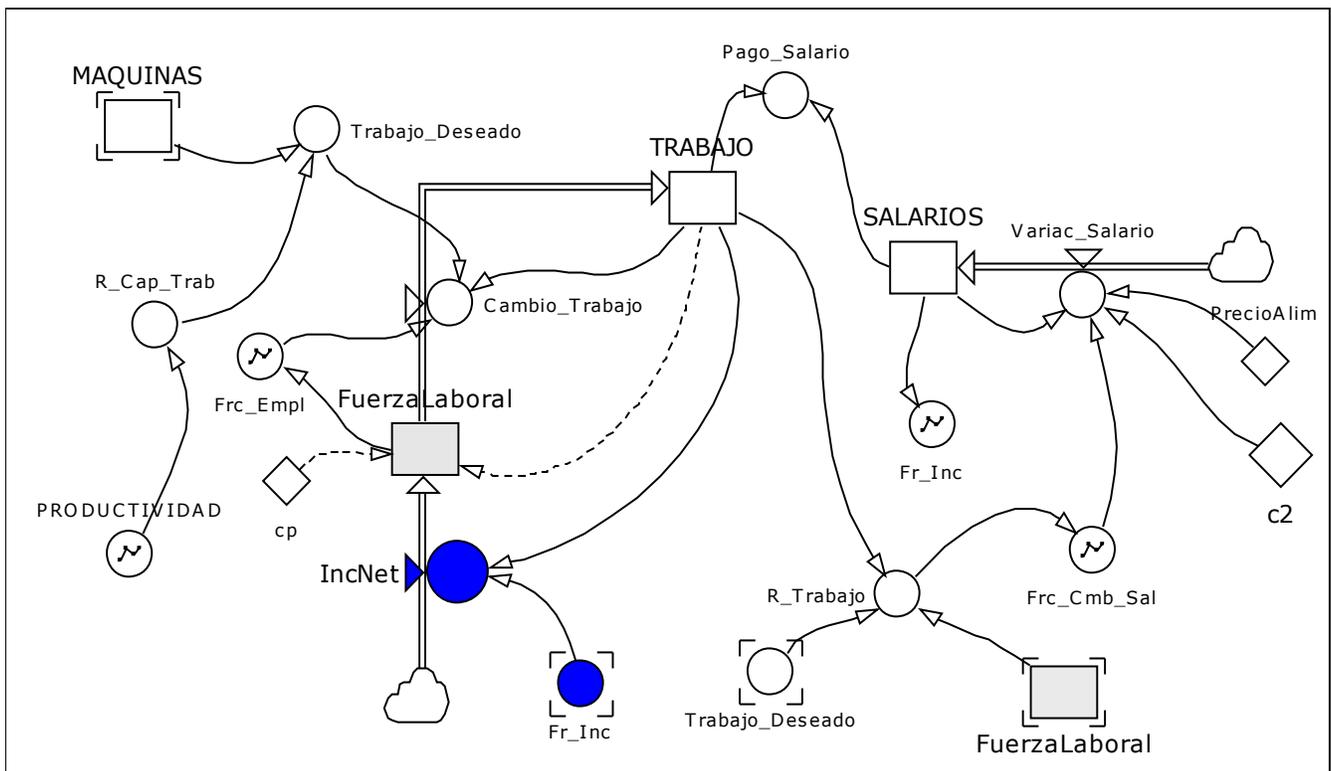


Figura A3. Experimento 4. Reducción en la mortalidad infantil. Fuente. Elaboración propia. Powersim Studio.