

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS FACULTAD DE INGENIERÍA CARRERA DE INGENÍERIA INDUSTRIAL

Ing. Martin Mayori Machicado
Ing. Felix Manzaneda Delgado
Ing. Alberto Arce Tejada
Ing. Freddy Gutierrez Barea
Ing. Marcos Montesinos Montesinos
Ing. Franz Zenteno Benitez

RECTOR a.i.
VICERRECTOR a.i.
SECRETARIO GENERAL
DECANO INGENIERÍA a.i.
VICE DECANO INGENIERÍA a.i.
DIRECTOR INGENIERÍA INDUSTRIAL

REVISTA INDUSTRIAL 4.0 EDICIÓN DIGITAL Nº 1 NOVIEMBRE 2020

COMITE EDITOR

Ing. Monica Lino

Ing. Mario Zenteno Benitez

Ing. Oswaldo Terán Modregon

DISEÑO VERSIÓN IMPRESA & WEB

Ing. Enrique Orosco Crespo

WEB

http://industrial.umsa.bo/revista-industrial-4.0

EMAIL

revistaindustrial4.0@umsa.bo

DIRECCION CARRERA INGENIERÍA INDUSTRIAL Av. Mcal. Santa Cruz Nº 1175 Plaza Obelisco Mezzanine, Edificio Facultad de Ingeniería industrial.umsa.bo ingeindustrial@umsa.bo ingeindustrialumsa@gmail.com

TELEFONOS 2205000 - 2205067 int. 1402

La Paz - Bolivia

MODELO MATEMÁTICO SEIR EN SIMULINK APLICADO A BOLIVIA Y EL DEPARTAMENTO DE LA PAZ

David Apaza Humiri, ORCID:0000-0002-8861-997X Ingeniería Industrial, Universidad Mayor de San Andrés davidpazindustrial@gmail.com

Juan Carlos Ignacio Garzón, ORCID:0000-0001-5992-955X Ingeniería Industrial, Universidad Mayor de San Andrés <u>juancarlosignaciogarzon@gmail.com</u>

Boris Parraga Andrade, ORCID: 0000-0001-9233-0768 Ingeniería Industrial, Universidad Mayor de San Andrés parragaandrade@gmail.com

Recibido: 22 de julio de 2020; Aprobado: 21 de septiembre de 2020

Resumen

La pandemia del Covid-19 surgida en Wuhan a finales del 2019, mostro lo poco preparados que estamos frente a una amenaza de tal magnitud, llegando a afectar no solo en aspectos de salud, sino también a la estabilidad social y economía de muchos países, y por supuesto Bolivia no es una excepción, alcanzando a casi 50.000 casos detectados de Covid-19 (13 de julio de 2020).

Desde el campo de la ingeniería y la simulación de modelos matemáticos nos proponemos mostrar el modelo matemático SEIR, el cual trata de explicar el comportamiento de una epidemia con el flujo de grupos: Sensibles – Expuestos – Infectados – Recuperados, es más aplicativo al comportamiento del Covid-19, debido a que incluye a los expuestos (entendidos como recién contagiados sin síntomas), caso diferente al modelo básico SIR, que no toma este aspecto esencial del Covid-19.

Se tratará de mostrar una simulación de este modelo en Simulink, aplicado a los casos de Bolivia, como también a los casos del departamento de La Paz, donde

Carrera de Ingeniería Industrial Facultad de Ingeniería Universidad Mayor de San Andrés según los resultados se evaluarán escenarios posibles a los cuales llegue la actual pandemia en el territorio boliviano y a nivel departamental.

Puesto que un modelo epidemiológico debe ser planteado con datos y variables disponibles al momento y elaborado con una complejidad superior a estos modelos, este modelo no pretende mostrar datos definitivos, solo trata de ser un modelo de alcance académico didáctico para dar pautas iniciales en la introducción de modelos epidemiológicos.

Palabras clave: Covid-19, modelo, simulación, SEIR, Simulink, Bolivia, La Paz

Summary

The Covid-19 pandemic that arose in Wuhan at the end of 2019, showed how unprepared we are to face a threat of such magnitude, affecting not only health aspects, but also the social and economic stability of many countries and Of course, Bolivia is not an exception, reaching almost 50,000 detected cases of Covid-19 (July 13, 2020).

From the field of engineering and the simulation of mathematical models we propose to show the SEIR mathematical model, which tries to explain the behavior of an epidemic with the flow of groups: Sensitive - Exposed - Infected - Recovered, it is more applicable to the behavior of the Covid-19, because it includes the exposed (understood as newly infected without symptoms), a case different from the basic SIR model, which does not take this essential aspect of Covid-19.

An attempt will be made to show a simulation of this model in Simulink, applied to the cases of Bolivia, as well as to the cases of the department of La Paz, where according to the results possible scenarios that the current pandemic in Bolivian territory will already be evaluated departmental level.

Since an epidemiological model must be proposed with data and variables available at the time and elaborated with a complexity superior to these models, this model does not pretend to show definitive data, it only tries to be a model of didactic academic scope to give initial guidelines in the introduction of epidemiological models.

Keywords: Covid-19, model, simulation, SEIR, Simulink, Bolivia, La Paz

1. Introducción

En el campo de la simulación, se entiende a un modelo matemático como un sistema interconectado de manera lógica, que trata de relacionar a variables, parámetros, entidades, subsistemas con el fin de estudiar comportamientos de la vida real muy complejos y difíciles de entender, dichos modelos tratan en algún grado aproximarse a dar una explicación parcial pero significativa del comportamiento de algún sistema de interés, como la actual pandemia que se está viviendo a nivel mundial.

Dentro del campo de modelos epidemiológicos se pueden plantear varios modelos que traten de explicar el comportamiento de alguna epidemia, entre el más famoso y simple se tiene el modelo SIR, planteado por W. O. Kermack y A. G. McKendrick en 1927 ¹, este modelo llega a ser simple en su entendimiento, ya que relaciona a los grupos de Sensibles-Infectados-Recuperados, incluyendo a este ultimo las muertes suscitadas por la epidemia, además de tomar una población fija (no se considera los nacimientos ni las muertes por otras causas),

Un caso especial del modelo SIR es el modelo SEIR, que incluye un grupo de Expuestos (individuos contagiados que aún no presentan síntomas), siguiendo una secuencia lógica de Sensibles-Expuestos-Infectados-Recuperados, al igual del modelo SIR, este modelo trabaja con una población fija, además de incluir a los fallecidos en el grupo de recuperados.

Para nuestro caso aplicativo utilizaremos este modelo para tratar de mostrar los posibles escenarios a los cuales nos expondremos en los siguientes meses.

En Bolivia, el incremento exponencial de casos principalmente en la región del oriente está llegando a un punto crítico, tal que la capacidad hospitalaria está siendo rebasada, donde además el criterio de cuarentena dinámica instruido por el gobierno central y la desobediencia de la población esta generado el incremento significativo de casos en las regiones de occidente, situación que se agrava con la crisis política que actualmente está viviendo el país con un gobierno de transición.

Además, en el contexto actual la crisis política está generando que se defina una fecha de elecciones nacionales acordado para el 6 de septiembre de este año, situación que agrava el contexto nacional, en una pandemia que hasta la fecha no está siendo controlada de manera efectiva.

Carrera de Ingeniería Industrial Facultad de Ingeniería Universidad Mayor de San Andrés

3

¹ (Hernandez Lopez, 2016)

2. Modelo matemático SEIR

Existen diferentes variaciones del modelo SEIR, el modelo en el cual nos basaremos será el básico, esto para poder tener mejor entendimiento según el comportamiento de las variables.

Sensibles \rightarrow Expuestos \rightarrow Infectados \rightarrow Recuperados

Según (Gutierrez & Varona, 2020), detalla las ecuaciones diferenciales del modelo SEIR básico:

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{\beta}{N} * S(t) * I(t)$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\beta}{N} * S(t) * I(t) - \sigma * E(t)$$

$$\frac{dI}{dt} = \sigma * E(t) - \gamma * I(t)$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma * I(t)$$

$$N = S(t) + E(t) + I(t) + (R(t))$$

Donde:

S Individuos Susceptibles

I Individuos Infectados

β Tasa de contagios (probabilidad de que una persona enferme al estar en contacto con un infectado)

E Individuos Expuestos (recién contagiados)

1/σ Tiempo promedio de incubación

γ tasa de recuperación (para un solo individuo)

R Individuos recuperados

N Población total

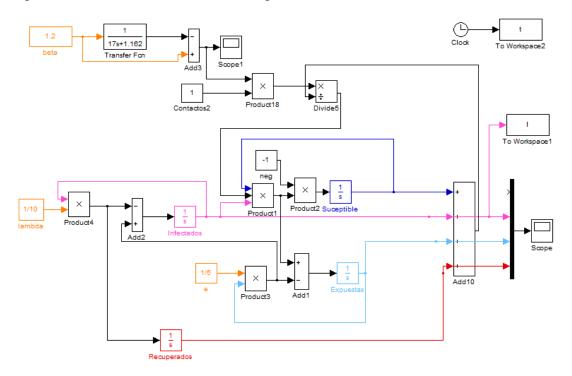
1/γ Es el periodo medio de recuperación

3. Diagrama dinámico del modelo SEIR en Simulink

Basados en (Borrelli & Coleman, 2002) y (Delgado, 2017), el modelo matemático SEIR fue llevado a una hoja de simulación en Simulink (MathWorks, 2011) el cual se muestra en la figura 1, el diagrama construido esta ordenado de una manera que el lector pueda entender la secuencia lógica de las relaciones entre los grupos según las ecuaciones diferenciales anteriormente planteadas.

Figura 1.

Diagrama de SEIR con tasa de contagios dinámica en Simulink



4. Datos para la simulación

En cuestión a los datos requeridos y obtenidos se dispone del historial de casos confinados, decesos y recuperados publicados por el ministerio de Salud (Ministerio de salud, 2020), y la página oficial del gobierno (Gobierno de Bolivia, 2020) hasta la fecha de la población de Bolivia y la población del departamento de La Paz asociados a esta pandemia.

4.1. Casos Bolivia

Los casos detectados por el ministerio de salud y las Sedes departamentales hasta el 13 de julio de 2020 llegan a rondar casi los 50.000 casos confirmados a nivel nacional, donde más del 51% corresponden a casos del departamento de Santa Cruz, los casos detectados en el departamento de La Paz alcanzan a la fecha un total de 7124 casos representando casi un 15 % del total de casos detectados a nivel nacional.

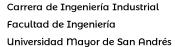
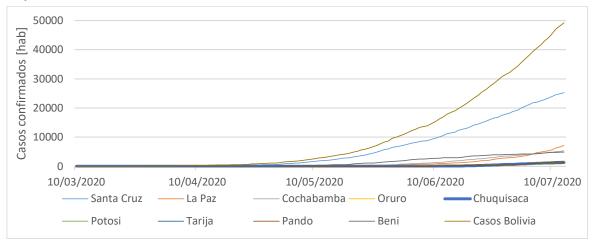


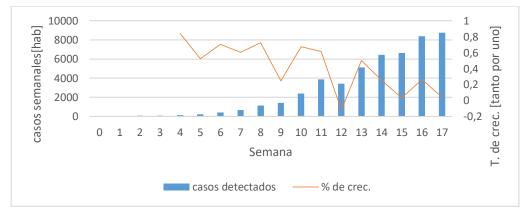
Figura 2.Casos Covid-19 acumulados, Bolivia y los 9 departamentos de 10 de marzo al 13 de julio



4.2. Análisis semanal

A 17 semanas de la detección del primer caso en Bolivia (10 de marzo de 2020), se tiene una desaceleración en crecimiento porcentual del número de casos cada semana, llegando a incrementarse la semana 17 un 4,26% respecto a la anterior semana, tendencia que muestra una desaceleración en el número de casos detectados, situación que llega a tener una disminución negativa cuando se pasa el punto más alto de la pandemia.

Figura 3.Casos determinados semanales de Covid-19, Bolivia (del 10 de marzo al 13 de julio de 2020)



4.3. Balance de grupos

Según los datos publicados por el ministerio de salud, de Casos detectados, fallecidos y recuperados se tiene el comportamiento mostrado en la figura 4, donde hasta el 13 de julio de 2020 se tiene que el número de casos aun infectados ronda

el 65% del total de infectados, el 31% se encuentra recuperado y el 3,79% falleció con la enfermedad.

Por lo anterior expuesto se tiene que tales datos al ser oficiales no tienen una precisión de la situación actual de los casos detectados (excepto los fallecidos), puesto que no se tienen detectados los casos latentes o asintomáticos(que en su mayoría se recuerdan sin mayor complicación) a esto también sumándole las pocas pruebas realizadas a las personas sospechosas en comparación a otros países, además el porcentaje de recuperados no llega a ser representativo ya que en muchos casos no se realiza el seguimiento de recuperación entre ellos los asintomáticos y casos de personas que no se realizan las pruebas por cuestiones económicas u otros factores.

Por lo anterior expuesto se entiende que los casos presentados por el ministerio de salud de manera diaria presentan un sesgo y falta de exactitud, llegando solo a presentar una parte del comportamiento de casos, esto debido a falta de monitoreo en varias regiones del país como el departamento de Pando que la anterior semana presentaba cero casos por falta de realización de pruebas.

Figura 4.Comportamiento de grupos del Covid-19 en Bolivia, del 10 de marzo al 13 de julio de 2020 (habitantes contagiados)



4.4. Estimación de casos por número de fallecidos

Debido al sesgo de los datos presentados por el Ministerio de Salud, se plantea un ajuste de estimación basado en la cantidad de fallecidos por Covid-19 reportados por el Ministerio de Salud, se plantea estimar el número de casos de Covid-19 usando la tasa de letalidad global estimado en función a la tendencia de estabilización que tiene la tasa de letalidad en Bolivia.

Según la figura 5 donde se puede apreciar los porcentajes de tasa de letalidad del Covid-19, se ve una tendencia de estabilización que esta entre el 3% y 4%, donde

Carrera de Ingeniería Industrial Facultad de Ingeniería Universidad Mayor de San Andrés se presenta un incremento suscitado desde el 29 de junio hasta la fecha, esto hace entender que el nuero de casos detectados por el ministerio de Salud, es menor al número de casos reales, ya que va en contra de la tendencia seguida, para esto se plantea un modelo econométrico que trate de explicar el comportamiento de la tasa de letalidad que se resume a continuación:

Comparando el modelo con los datos de la tasa de letalidad se tiene:

Figura 5.Tasa de Letalidad del Covid-19 real y estimado, Bolivia (2020)



Considerando el modelo anteriormente estimado se estimará la cantidad de casos contagiados de Covid-19 que se muestra en la siguiente figura:

Figura 6.

Ajuste de Infectados según fallecidos, Infectados activos, Recuperados, y fallecidos,

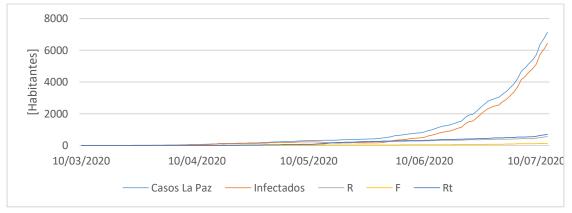


Carrera de Ingeniería Industrial Facultad de Ingeniería Universidad Mayor de San Andrés

4.5. Casos departamento de La Paz

El análisis en los casos de La Paz será más general, basándonos en los reportes oficiales presentados por el Ministerio de Salud, donde en las últimas semanas se vio un incremento exponencial de los casos, alcanzando al 13 de julio más de 7000 casos confirmados, donde además este caso acelerado de casos produjo una reducción al porcentaje de recuperados que ronda el 8% del total de casos presentados.

Figura 7.
Casos de Covid-19 según grupos acumulados, La Paz.



5. Tasas para la simulación

5.1. Tiempo promedio de incubación (1/ ϵ)

Es el tiempo promedio en el cual la persona portadora del virus tarda en incubar en el organismo del individuo hasta presentar algún síntoma referente a este virus, para el caso particular de esta enfermedad el tiempo de incubación en promedio 5 [días]², teniendo como tasa de incubación 1/5 [1/días].

5.2. Tiempo de recuperación $(1/\gamma)$

Según la situación en diferentes países o regiones, el tiempo de recuperación varía según las condiciones en la que se encuentran varios factores como: su sistema de salud, su población en aspectos de salud (enfermedades, desnutrición, sedentarismo, longevidad), aspectos que influyen directamente en el grado de recuperación de la población al virus.

Para tal efecto en el caso de Bolivia esta tasa de recuperación varía según la región, ya que los sistemas de salud de regiones alejadas del sistema troncal tienen diferentes problemas en situaciones de equipamiento, personal, infraestructura y logística, caso diferente a las regiones del eje troncal (La paz, Santa Cruz, Cochabamba).

Carrera de Ingeniería Industrial Facultad de Ingeniería Universidad Mayor de San Andrés

9

² (Ortega, Amargo, & Muñoz, 2020)

Esta tasa varía según la región, aspecto que puede acelerar o disminuir los casos de recuperados a Covid-19, respecto a los casos de recuperados reportados oficialmente se ve un retraso de recuperación, que se entendería como un tiempo mayor de recuperación al virus (situación que no es así), por el contrario, se puede afirmar que la baja tasa de recuperados se debe a la falta de monitoreo o registro de recuperados por el Ministerio de salud.

Se considerará diferentes tiempos de recuperación para ajustar las curvas a los datos presentados por el Ministerio de Salud, escenarios pesimistas, esperados y optimistas que se manejes en función al grado de recuperación de la población.

5.3. Tasa de contagios (β)

Esta tasa considera el grado de contagio que puede tener una población según el grado de dispersión del virus, dado que si esta es muy alta se deberá al numero de contactos que tiene la población y si disminuye (caso de la situación de cuarentena) se habrá disminuido el grado de contactos entre personas, así que, en una situación real en el tiempo, esta tasa es dinámica que tiene una tendencia descendiente hasta un punto de estabilidad de acuerdo a la evolución de Virus en el tiempo.

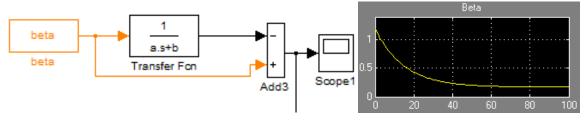
Situación que se considera para disminuir la curva de contagios y predecir la evolución de la curva si no se dispone de acciones para prevenir el crecimiento exponencial de casos.

En Bolivia según a lo que se observa por los casos presentados de manera oficial por el ministerio de salud, la curva de infectados real tiene una tendencia de disminución, esto debido a las acciones tomadas por el gobierno y la población como: la cuarentena, la cuarentena dinámica, los encapsulamientos, y las medidas de bioseguridad que disminuyo esta tasa de contagios.

Para la simulación se considerará una tasa de contagios dinámica, que se explicara mediante una función de transferencia explicando el comportamiento de esta curva decreciente, para tal efecto se tiene la siguiente función de transferencia:

Figura 8.

Función de transferencia genérica para la tasa de contagios, Bolivia.



Donde:

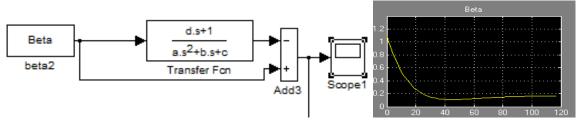
Beta: Tasa de contagios inicial que se tiene al inicio del Covid-19

- a: Grado de rapidez de disminución de la curva al límite de estabilidad
- **b**: Límite de estabilidad final de la tasa de contagios

En el caso específico del departamento de La Paz se ve un comportamiento más complejo al ser una población más reducida, donde al parecer se tiene un comportamiento de contención del Covid-19, hasta la semana 10 manteniéndose debajo de los 1000 casos activos, después de este periodo los caso activos incrementaron exponencialmente llegando hasta el 13 de julio de 2020 a más de 7000 casos, con este criterio se planteara una tasa de contagio de comportamiento de segundo orden para representar tal contención como se ve en la figura 9.

Figura 9.

Función de transferencia genérica para la tasa de contagios, La Paz.



Donde:

Beta: Tasa de contagios inicial que se tiene al inicio del Covid-19

a: Amplitud inicial de contención de la tasa de contagios

b: Grado de contención de la tasa de contagios

c: Límite de estabilidad final de la tasa de contagios

d: Frecuencia de estabilidad de la tasa de contagios

6. Simulación de escenarios

6.1. Bolivia

6.1.1. Escenario según casos oficiales

Teniendo un punto de partida los datos oficiales publicados por el Ministerio de Salud se tendrá un periodo de recuperación muy alto (31 días) mediante el cual se modelará la curva de infectados con una β_0 =1,6 (a=11, b=1.0505), según estos parámetros iniciales se tiene un ajuste a la curva que se observa en la figura 10.

Respecto a la simulación de este escenario, aunque se ajusta muy bien a los datos publicados oficialmente, se tiene una incongruencia en los parámetros por el tiempo de recuperación (31 días) que no corresponde al tiempo real de recuperación (5 a 15 dias), por tal motivo se puede concluir que existe un sesgo muy amplio en los datos de recuperados por Covid-19 publicados por el gobierno, posiblemente por los sistemas de monitoreo y por la población latente (expuesta asintomática) que no presenta un cuadro complicado.

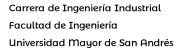


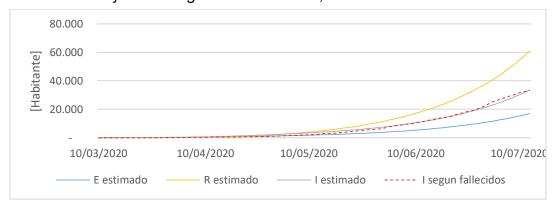
Figura 10.
Escenario asustado según datos oficiales, Bolivia.



6.1.2. Escenario critico (t de recuperación= 15 dias)

Teniendo como punto de partida los datos oficiales publicados por el Ministerio de Salud, se considera un periodo de recuperación de 15 días, mediante el cual se modelará la curva de infectados con una β_0 =1,6 (a=12, b=1.081), en función a estos parámetros iniciales se tiene un ajuste a la curva que se observa en la figura 11.

Figura 11.
Escenario critico ajustado según datos oficiales, Bolivia.



Con este modelo se plantea una proyección de casos hasta el 6 de septiembre y además determinar el punto más alto según este modelo.

Tabla 1.Proyección de casos según escenario critico [Habitantes]

Grupo del modelo	Hasta 6 de septiembre	Pico más alto (24/11/20)
Infectados	201.800	963.700
Expuestos	98.610	331.200
Recuperados	402.800	3.574.000

6.1.3. Escenario esperado de casos de Covid-19

Teniendo como punto de partida los datos oficiales publicados por el Ministerio de Salud, se considerará un periodo de recuperación de 8 días, mediante el cual se modelará la curva de infectados con una β_0 =1,6 (a=15, b=1.13), en función a estos parámetros iniciales se tiene un ajuste a la curva que se observa en la figura 12. Con este modelo se plantea una proyección de casos hasta el 6 de septiembre y además determinar el punto más alto según este modelo.

Figura 12.

Escenario esperado asustado según datos oficiales, Bolivia.

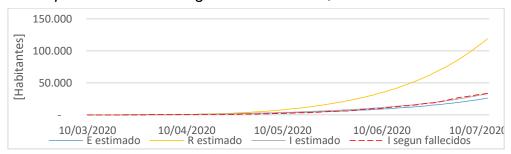


Tabla 2.Proyección de casos según escenario esperado, Bolivia. [Habitantes]

Grupo del modelo	Hasta 6 de septiembre	Pico más alto (8/11/20)
Infectados	160.500	394.200
Expuestos	120.500	245.600
Recuperados	679.700	3.074.000

6.1.4. Escenario optimista de casos de Covid-19

Teniendo como punto de partida los datos oficiales publicados por el Ministerio de Salud, se considerará un periodo de recuperación de 5 días, mediante el cual se modelará la curva de infectados con una β_0 =1,6 (a=18, b=1.214), en función a estos parámetros iniciales se tiene un ajuste a la curva que se observa en la figura 13. Con este modelo se plantea una proyección de casos hasta el 6 de septiembre y además determinar el punto más alto según este modelo.

Figura 13. *Escenario optimista asustado según datos oficiales, Bolivia.*

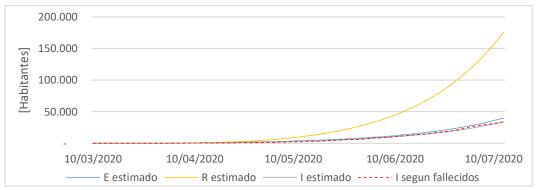


Tabla 3.Proyección de casos según escenario optimista, Bolivia. [Habitantes]

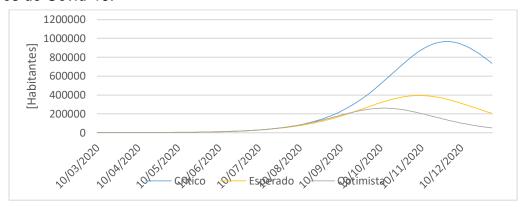
Grupo del modelo	Hasta 6 de septiembre	Pico más alto (10/10/20)
Infectados	171.000	260.200
Expuestos	189.600	261.500
Recuperados	1.144.000	2.726.000

6.1.5. Comparación de los escenarios

Viendo los tres escenarios según los casos activos acumulados de infectados se tiene:

Figura 14.

Comparación de escenario crítico, esperado y optimista según el número de casos activos de Covid-19.

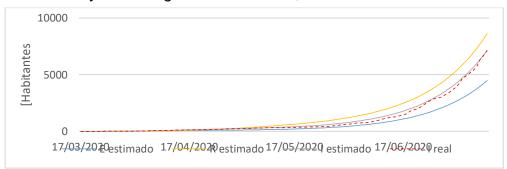


6.2. Departamento de La Paz

6.2.1. Escenario critico según casos oficiales

Teniendo como punto de partida los datos oficiales publicados por el Ministerio de Salud, se considera un periodo de recuperación de 15 días, mediante el cual se modelará la curva de infectados con una β_0 =1,1 (a=300, b=32, c=1.176, d=20), en función a estos parámetros iniciales se tiene un ajuste a la curva que se observa en la figura 15.

Figura 15.
Escenario critico ajustado según datos oficiales, La Paz.



Con este modelo se plantea una proyección de casos hasta el 6 de septiembre, además determinar el punto más alto según este modelo.

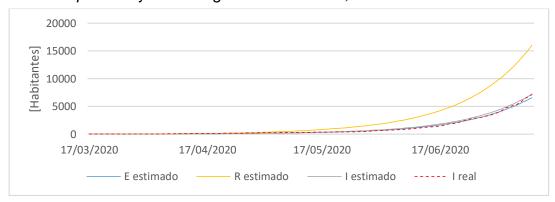
Tabla 4.Proyección de casos según escenario crítico, La Paz [Habitantes]

Grupo del modelo	Hasta 6 de septiembre	Pico más alto (14/10/20)
Infectados	158.300	493.200
Expuestos	90.950	161.700
Recuperados	195.900	1.212.000

6.2.2. Escenario esperado de casos de Covid-19

Teniendo como punto de partida los datos oficiales publicados por el Ministerio de Salud, se considera un periodo de recuperación de 8 días, mediante el cual se modelará la curva de infectados con una β_0 =1,1 (a=300, b=36, c=1.276, d=20), en función a estos parámetros iniciales se tiene un ajuste a la curva que se observa en la figura 16.

Figura 16.
Escenario esperado ajustado según datos oficiales, La Paz.



Con este modelo se plantea una proyección de casos hasta el 6 de septiembre y además determinar el punto más alto según este modelo.

Tabla 5.Proyección de casos según escenario esperado, La Paz. [Habitantes]

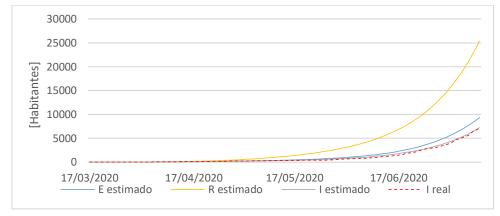
Grupo del modelo	Hasta 6 de septiembre	Pico más alto (4/10/20)
Infectados	127.900	240.900
Expuestos	105.100	154.300
Recuperados	327.700	1.009.000

6.2.3. Escenario optimista de casos de Covid-19

Teniendo como punto de partida los datos oficiales publicados por el Ministerio de Salud, se considera un periodo de recuperación de 5 días, mediante el cual se modelará la curva de infectados con una β_0 =1,1 (a=500, b=43, c=1.455, d=20), con

estos parámetros iniciales se tiene un ajuste a la curva que se observa en la figura 17.

Figura 17.
Escenario optimista ajustado según datos oficiales, La Paz.



Con este modelo se plantea una proyección de casos hasta el 6 de septiembre y además determinar el pico alto según este modelo.

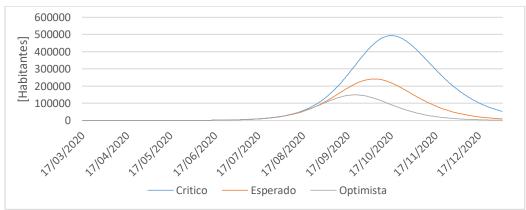
Tabla 6.Proyección de casos según escenario optimista, La Paz [Habitantes]

Grupo del modelo	Hasta 6 de septiembre	Pico más alto (24/09/20)
Infectados	116.800	149.000
Expuestos	133.200	147.700
Recuperados	521.700	1.020.000

6.2.4. Comparación de los escenarios

Viendo los tres escenarios según los casos activos acumulados de infectados se tiene:

Figura 18. Comparación de escenario crítico, Esperado y optimista según el número de casos activos



7. Análisis y evaluación de resultados

Según los datos obtenidos mediante la simulación de los escenarios del comportamiento del Covid-19 a nivel nacional y departamental se tiene:

Escenarios a nivel País.

Entendiendo de una manera correcta al modelo SEIR se puede ver como pauta inicial el comportamiento de dicho modelo en función a los parámetros de simulación, siendo su entendimiento fundamental para poder modelar y comprender los resultados de dicho modelo para esto se expone la siguiente experiencia generada de las simulaciones efectuadas:

- Tiempo promedio de incubación; representando el tiempo que toma a una persona incubar el virus en su organismo hasta presentar los primeros síntomas, este tiempo según casos reales esta entre los 5 días, donde la persona empieza a presentar síntomas, presentado un entendimiento muy adecuado al comportamiento real de los casos asintomáticos, los cuales serían como casos no considerados o no detectados con exactitud, en la mayoría de las simulaciones este paramento mostro una tendencia similar a los casos detectados de infectados, incrementado así el número de personas recuperadas de una manera más rápida.
- Tiempo de recuperación; fue la base para definir los escenarios previstos de la evolución del Covid-19 en el tiempo, siendo así una tasa que explicaría la evolución global de recuperación de la población, tomando como tasa critica un límite de 15 dias se entendería que la población se recupera de manera muy lenta alargando e incrementado los casos de infectados en estado crítico, lo que hace ver que es un factor muy importante a la hora de combatir dicha pandemia, siendo que si la población se mantiene saludable mejorando sus defensas y además mejorar las condiciones del sistema de salud, las posibilidades de adquirir medicamentos, o el hecho de usar plasma hiperinmune generaría disminuir el tiempo de recuperación, factor que sería muy importante a la hora de combatir el Covid-19 ya que disminuiría el número de casos críticos y además aceleraría de manera favorable la conclusión de este virus, caso contrario, si se disminuye las defensas mediante el estrés, se genera susceptibilidad al contagio u otros factores de salud, como no mejorar las condiciones del sistema de salud entre otras acciones provocaría el incremento de este tiempo de recuperación generando lo que se entiende como el escenario más crítico simulado con el modelo.
- Tasa de contagios; es muy representativa a la hora de entender la evolución de la pandemia hace entender que esta tasa es fundamental para poder combatir al Covid-19, conjuntamente al tiempo de recuperación se puede determinar la

evolución de esta pandemia, según a la experiencia ganada con la simulación se entiende a esta tasa de contagio como un factor que se define en función a el número de contactos globales de la población, ahí es donde se entendería la aplicación de una cuarentena para reducir y alargar el punto más alto de la pandemia, debido a que se disminuiría el número de contagios en el momento donde las personas no están preparadas realmente para enfrentar al Covid-19, y llevando la curva de contagios a un punto donde ya habría personas inmunes al virus, un sistema de salud preparado, y un contagio controlado local de personas(estabilidad de la tasa de contagios).

Dependiendo el grado en el cual enfrentemos al virus, se ve que ahora la tasa de contagios tiene gran significancia debido a que debe estabilizarse evitando el contagio local y manteniendo las medidas de prevención al contagio, también se debe tratar de reducir el tiempo de recuperación siendo que si se trabaja de manera efectiva en este parámetro (sistema de salud, reforzamiento de las defensas de la población, incentivar la donación de plasma hiperinmune, provisión de oxígeno para personas críticas, además de la gestión de medicamentos o vacunas), se tendría una evolución similar a un escenario optimista o esperado.

8. Conclusiones

El modelo SEIR construido en Simulink de MatLab, posibilito el adecuado entendimiento de la actual pandemia, siendo más preciso para ver el caso de los asintomáticos, y que en función al tiempo de recuperación que mostraría la evolución de la curva favorable cuando este tiempo es más corto, e incrementaría si es más largo, respecto a la tasa de contagios, llega a ser primordial para analizar y modelar la curva real de contagios, que según a lo que se pretendió mostrar en el modelo tiene un comportamiento dinámico, planteado así un posible control de la curva mediante el control de los contagios(cuarentena, distanciamiento, medidas de bioseguridad, equipos de protección), que ayudara a disminuir el crecimiento exponencial de casos de contagios detectados, al ser dinámico se entiende que tiene un comportamiento variado decreciente (si se controla los contagios) pero puede incrementar en cualquier momento produciendo un rebrote o un crecimiento exponencial de los casos.

El fin de la simulación de los escenarios no fue para determinar la cantidad exacta de casos de infectados, más al contrario es para dar pautas de acción para poder controlar de una manera adecuada la actual pandemia y poder definir a que escenarios se puede llegar y hasta que magnitud, en lo que respecta a los posibles escenarios se considera que en un escenario optimista se llegaría a nivel nacional

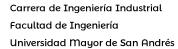
a 260.200 contagiados con síntomas a inicios de octubre, y en el caso más crítico 963.700 contagiados con síntomas, habiendo una diferencia muy considerable entre ambos escenarios, lo que hace entender que hay aun opciones para crear un plan de acción y poder controlar la actual pandemia.

Según el comportamiento del departamento de La Paz, se ve una buena evolución del virus desde el primer caso en La Paz hasta inicios de junio, encontrándonos actualmente en un incremento acelerado de casos confirmados, según los escenarios planteados en las simulaciones en un escenario optimista se tendría al menos 149.000 contagiados con síntomas a finales de septiembre, y en el caso más crítico 493.200 contagiados con síntomas, habiendo una diferencia muy considerable entre ambos casos, situación que también plantea la opción de ejecutar medidas para poder estabilizar este crecimiento de manera favorable para la población.

Bibliografía

- Borrelli, R., & Coleman, C. (2002). *Ecuaciones diferenciales. Una perspectiva de modelizació.* Mexico: Oxford University Express.
- Delgado, J. a. (2017). *Dinamica de sistemas aplicada en la epidemiología.* Las matematicas en la lucha contra las epidemias.
- Gobierno de Bolivia. (Junio de 2020). *Bolivia Segura Covid-19.* Obtenido de https://www.boliviasegura.gob.bo
- Gutierrez, J. M., & Varona, J. L. (2020). *Analisi del Covid-19 por medio de un modelo SEIR*. Sevilla: Instituto de Matematicas de la Universidad de Sevilla.
- Hernandez Lopez, A. (2016). Estudio numerico de un modelo de propagacion de enfermedades. Zaragoza: Universidad Zaragoza.
- MathWorks. (2011). MatLab-Simulink R2011a. Obtenido de www.mathworks.com
- Ministerio de salud. (junio de 2020). *Ministerio de salud-Bolivia*. Obtenido de www.minsalud.gob.bo
- Ortega, D., Amargo, D., & Muñoz, E. (2020). Predicciones de un modelo SEIR para casos de Covid-19 en Cali Colombia. *Revista de salud Publica*, 1-6.
- Pliego P., E. (2011). *Modelos Epidemiologicos de enfermedades virales infecciosas*. Puebla: Benemerita Universidad Autónoma de Puebla.
- Ruiz Anizar, E. (2016). Diseño del modelo matematico SEIRD con vacunación para la simulación de la propagación de enfermedades infecciosas.

 Mexico,D.F.: Instituto Politecnico Nacional.



- V. Grigorieva, E., & B Deignan, P. (2017). Problema de control para un modelo del tipo SEIR de la epidemia del Ebola. *Revista de Matematica: Teoria y Aplicaciones*, 79-96.
- Vazquez, k., Monzon, M., & Hernandez, J. (s.f.). Modelo "SIR" para epidemias: persistencia en el tiempo y nuevos retos en la era de la informatica y las pandemias. *Revista Cubana de Informacion Médica*.



CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL ACREDITADA AL SISTEMA ARCU-SUR, DEL MERCOSUR EDUCATIVO



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES INDUSTRIALES



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AMAZÓNICAS



INSTITUTO NACIONAL UNIVERSITARIO DE INVESTIGACIÓN EN SEGURIDAD INDUSTRIAL Y SALUD OCUPACIONAL



UNIDAD DE POSGRADO INDUSTRIAL



UNIDAD DE SISTEMAS INGENIERÍA INDUSTRIAL



UNIDAD DE GESTIÓN DE LA CALIDAD

