

Modelo de Distribución de Plantas Móviles de Oxígeno para Satisfacer su Demanda en un Centro Hospitalario ante una Segunda Ola de Covid-19

Distribution Model of Mobile Plants of Oxygen to satisfy its requirement in a Hospital Center in Second Wave of Covid-19

Sebastián Roger Mendez Lagos, estudiante Pre-grado¹, Joshua Ernesto Robert Fuentes Angulo, estudiante Pre-grado², Marco Antonio Díaz Díaz, Master en Ciencias³
^{1,2,3}Universidad Privada del Norte, Perú, n00169379@upn.pe, n00202000@upn.pe, marco.diaz@upn.pe

Resumen– La aparición de una segunda ola de COVID-19 en el Perú, trajo como una de sus consecuencias, la alta demanda de consumo de oxígeno medicinal haciendo énfasis en la importancia de la distribución de las plantas que lo producen para satisfacer a los hospitales que lo requieran. Frente a esto, la búsqueda de una respuesta no solo debe cubrir las necesidades proyectadas dentro de los próximos meses, también debe ser al menor costo posible. El programa LINGO usa diversos métodos para la solución de distintos problemas sobre toma de decisiones. Dentro de estos, la Programación Lineal Entera es uno de los métodos que otorgan la posibilidad de alcanzar el objetivo de esta investigación. En el desarrollo de este paper veremos paso a paso cómo se aplicó los datos de uno de los hospitales de Lima a un modelo creado específicamente para la distribución de plantas móviles de oxígeno resultando en la efectividad de este, cumpliendo los parámetros establecidos en el objetivo.

Palabras Clave: Programación Lineal, oxigenoterapia, costo mínimo, modelo, O₂.

Abstract– The emerge of a second wave of COVID-19 in Peru, brought as one of its consequences, the high demand for medicinal oxygen consumption emphasizing the importance of the distribution of the plants that produce it to satisfy the hospitals that require it. Faced with this, the search for an answer must not only cover the projected needs within the next few months, it must also be at the lowest possible cost. The LINGO program uses various methods to solve different decision-making problems. Among these, the Integer Linear Programming is one of the methods that give the possibility of achieving the objective of this research. In the development of this paper we will see step by step how the data from one of Lima city

hospital was applied to a model created specifically for the distribution of mobile oxygen plants, resulting in its effectiveness, complying with the parameters established.

Keywords: Linear Programming, oxygen therapy, minimum cost model, O₂.

I. INTRODUCCIÓN

La oxigenoterapia es una herramienta fundamental para el tratamiento de la insuficiencia respiratoria, tanto aguda como crónica. Los objetivos principales que llevan a su empleo son tratar de prevenir la hipoxemia, tratar la hipertensión pulmonar y reducir el trabajo respiratorio y miocárdico. El método de *Pressure Swing Adsorption* utiliza un tamiz molecular de zeolitas sintética, las que tienen la particularidad de atraer y absorber el nitrógeno del aire cuando es conducido a alta presión y luego lo libera a baja presión. Permitiendo la producción de oxígeno medicinal. El proceso es monitoreado continuamente por medio de un analizador paramagnético (análisis de concentración de oxígeno) y el gas producido debe cumplir con los requisitos establecidos en las farmacopeas para el O₂ del 93% en composición. Cabe señalar que este método de producción es la base de varias fuentes de oxígeno, que van desde el sistema centralizado de los hospitales hasta diferentes equipos portátiles concentradores de oxígeno. [1]

El 15% de pacientes con COVID-19 desarrollarán una forma grave de la enfermedad que requerirá oxígeno suplementario como parte del tratamiento de soporte. En el Perú, el número de casos continúa creciendo de manera sostenida, así como también el número de muertes debidas a

Digital Object Identifier: <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.209>
ISBN: 978-958-52071-8-9 ISSN: 2414-6390
DO NOT REMOVE

esta infección. Así, el número de pacientes con COVID-19 que requiere atención intrahospitalaria impone serios desafíos a los subsistemas de salud peruanos para cubrir la demanda de oxígeno medicinal a través de diferentes modalidades de oxigenoterapia. [2]

Las autoridades del Reino Unido informaron a la OMS que habían identificado una nueva cepa variante del SARS-CoV-2 mediante secuencia genómica viral. Esta variante se denomina SARS-CoV-2 VUI202012/01 y los análisis iniciales indican que la variable puede propagarse más fácilmente entre las personas. Por ello se están llevando a cabo otros análisis para definir si esta variante está asociada con algún cambio en la gravedad de los síntomas, la respuesta de los anticuerpos o la eficacia de la vacuna. En las hospitalizaciones se observó un descenso progresivo hasta la semana 50, incrementándose en la Semana 51 en 4.5% y en la Semana 52 en un 5.5%. Por otro lado, se ha observado una variación en la proporción de casos confirmados por pruebas positivas a PCR (Reacción en Cadena de la Polimerasa) en los últimos 10 días, con valores promedio de 35% a valores promedio de 58%. Luego del levantamiento de la suspensión de las medidas de aislamiento social obligatorio, la ampliación de la reactivación de la fase IV y las movilizaciones masivas por fiestas de fin de año, se evidenció un incremento de casos y defunciones por COVID-19 en diferentes departamentos del país, donde los hospitales están completando la ocupación de su capacidad de camas COVID (UCI y no UCI). [3]

La programación lineal involucra la selección de un conjunto de variables de decisión y sus cantidades que maximizan una función lineal objetivo y una serie de restricciones lineales. Los sistemas de ecuaciones resueltos por programación lineal deben cumplir con las siguientes características: divisibilidad, proporcionalidad, aditividad, no hacer uso de disyunciones inclusivas (y/o) y ser determinísticos. La programación lineal es un procedimiento matemático relativamente reciente cuyo desarrollo data de la mitad del siglo XX. Este avance es catalogado por muchos como uno de los avances científicos más importantes del siglo pasado si tenemos en cuenta su impacto y campo de aplicación en las ciencias, tales como la ingeniería, economía, sociología, biología entre otras. Se desarrolló durante la segunda guerra mundial para planificar los ingresos y los egresos, reduciendo los costos de la guerra y maximizando el daño en el enemigo. La programación lineal posee una amplia aplicación en las ciencias, que cuando utilizada permite maximizar la utilización de los recursos y reducir los costos de producción [4].

El objetivo de este trabajo es que ante el exceso de la demanda de oxígeno medicinal por parte de los pacientes con COVID-19 mediante la formulación de un modelo matemático de programación lineal otorgar una distribución rápida y adecuada de plantas móviles de oxígeno medicinal al más bajo costo del mercado.

II. MÉTODO

Los investigadores obtuvieron los datos (ver TABLA I) del estado del oxígeno total que puede dar el Hospital Nacional Edgardo Rebagliati (HNER) a la fecha del 28 de enero del 2021 [3].

TABLA I
ESTADO DEL OXÍGENO

	Cantidad de oxígeno total (m ³)	Cantidad de oxígeno consumido (m ³)	Cantidad de oxígeno disponible (m ³)
Hospital Nacional Edgardo Rebagliati	44,405	9,980	34,425

Nota: Los datos de la página OpenCovid se actualiza cada 24 horas

Los costos de alquiler utilizados fueron de dos empresas diferentes, ambas otorgaban el mismo nivel de capacidad de tres plantas móviles, pero a diferentes precios; la relación de estos montos se puede visualizar en la Tabla 2.

TABLA II
COSTO DE ALQUILER (EN DÓLARES)

Empresa	Plantas	Mes 1
Empresa 1	Planta 1	16,000
	Planta 2	30,000
	Planta 3	55,000
Empresa 2	Planta 1	15,000
	Planta 2	30,000
	Planta 3	60,000

Nota: Esta tabla muestra el costo que el alquiler mensual de cada planta móvil dependiendo de la empresa a la que pertenezca.

Según el reporte de “ALERTA EPIDEMIOLÓGICA” durante la segunda ola de COVID-19 la nueva variante es más contagiosa, por tal motivo se planteó una situación extrema donde la cantidad de pacientes confirmados de COVID-19 necesiten oxigenoterapia, además, se escogió hacer una proyección tomando de referente a los 4 meses de mayor pico de contagiados confirmados en la primera ola de COVID-19 en el Perú (mayo, junio, julio y agosto). Se obtuvo el valor promedio para el hospital a usar, mediante la división del total de contagiados por mes (Fig. 1) entre la cantidad de hospitales que tiene la región de Lima, 444 centros de salud. [5]



Fig. 1 Gráfico de contagiados confirmados por Covid-19 en el Perú desde marzo 2020 a enero 2021.

Fórmula sobre el cálculo del valor promedio de contagiados confirmados por centro de salud:

$$\text{Valor Prom.} = (\text{Cant. de casos Conf. al mes}) / (\text{Cant. de centros de salud en Lima}) \quad (1)$$

TABLA III
APLICACIÓN DE FÓRMULA (1) EN BASE A LOS MESES DE REFERENCIAS

Mes	Referencia	Valor promedio (contagiados)
1	Mayo	334.50
2	Junio	275.88
3	Julio	418.15
4	Agosto	489.97

Fuente: Elaboración Propia

Debido a que se tuvo como limitación el acceso de información por la coyuntura que atraviesan los centros de salud nacionales, el hospital tuvo dificultades con la entrega de información; por ello, a través de una entrevista al paciente Miguel Angel Vizcarra Romero (40 años) que estuvo infectado con COVID-19, se pudo saber que el consumo de oxígeno medicinal que él requirió fue de 2 semanas aproximadamente, además que su consumo fue de un balón de 10 m³ se termina en 12 horas.[7] Este dato mencionado por el sr. Vizcarra se utilizó para obtener un valor referencial de la demanda que vendría enfrentando el hospital mencionado para la solución de este modelo.

$$\frac{20\text{m}^3}{\text{día}} \times \frac{14\text{día}}{2\text{semana}} = \frac{280\text{m}^3}{2 \text{ semana}} = \frac{280\text{m}^3}{\text{mes}}$$

Nota: Dos semanas es igual a un mes, ya que el uso de 2 semanas solo se hace en un mes

Al haber tenido los datos del consumo de m³ de oxígeno por mes de una persona se calculó la demanda por mes: mes 1, mes 2, mes 3 y mes 4, aplicando lo siguiente:

$$\text{Demanda} = \text{Valor prom.} \times 280\text{m}^3 \quad (2)$$

TABLA IV
APLICACIÓN DE LA FÓRMULA (2) EN BASE A LOS MESES DE REFERENCIA

Mes	Demanda (m ³ /mes)
1	93662
2	77215
3	117084
4	137194

Fuente: Elaboración Propia

Luego, para la obtención de los costos de alquiler de las plantas móviles, según las capacidades de estas, se buscó en el mercado, empresas que otorgan este servicio; se obtuvo los precios mencionados en la TABLA VI, estos precios son de 3 plantas con capacidades distintas de 2 empresas. Cabe mencionar, que estos valores son volubles debido a que puede verse afectado por infinidad de factores. Al trabajar con meses futuros, a estos precios iniciales se les agregó un incremento, ya que estos se elevan debido a la alta demanda que esté atacando en su momento. Utilizamos variaciones que pueden verse en la tabla V.

TABLA V

DATOS DE LA VARIACIÓN POR MES DE LAS PLANTAS A ADQUIRIR

Empresa	Planta	Capacidad	Variación por Mes (%)
1	1	39600	15
	2	72000	15
	3	144000	10
2	1	39600	15
	2	72000	15
	3	144000	10

Fuente: Elaboración Propia

TABLA VI
DATOS DE LA CAPACIDAD Y COSTOS PROYECTADOS POR MES DE LAS PLANTAS A ADQUIRIR

Empresa	Planta	Capacidad	Costo (\$) Mes 1	Costo (\$) Mes 2	Costo (\$) Mes 3	Costo (\$) Mes 4
1	1	39600	16000	18400	21160	24334
	2	72000	30000	34500	39675	45626.25
	3	144000	55000	60500	66550	73205
2	1	39600	15000	17250	19837.50	22813.13
	2	72000	30000	34500	39675	45626.25
	3	144000	60000	66000	72600	79860

Fuente: Adaptado de [8]

Se empleó programación lineal entera, este método es utilizado para resolver problemas que tienen variables de decisión que no utilicen decimales. Así mismo, para el desarrollo de este modelo de programación se usó el programa LINGO, que es una herramienta simple para formular problemas lineales enteros, resolverlos y analizar su solución.

Una vez ordenados los datos recolectados, se modelaron en LINGO. Se definió las variables y determinó los índices a utilizar (Ver Fig. 2).

```
!Xijk: Cantidad de Plantas de capacidad i
a alquilar de la empresa j en el mes k;

!i = Tipo de Planta;
!j = Empresa;
!k = Mes;
```

Fig. 2 Definición de índices y de la variable.

Los índices son tres parámetros; empresa, planta y mes, dentro de estos se menciona el nombre que se le dará a cada conjunto de datos, se eligieron a que índice pertenecen estos conjuntos según su dependencia; por ejemplo, la CAP_ACT hace referencia a la disponibilidad de oxígeno que tiene el hospital mes a mes, como este valor depende del mes en el que se encuentre, pertenece al índice de "MES"; lo mismo se realizó para los demás conjuntos de datos (Revisar TABLA VII). Luego, se notó que algunos conjuntos no dependen solo de un índice, sino de los tres, por ello se creó un sub-índice donde también se colocó la variable X, esta es la nos dio el resultado buscado (Ver Fig. 3).

```
SETS:
EMPRESA/1..2/;
PLANTA/1..3/:CAP_AOT;
MES/1..4/:CAPACIDAD, CAP_ACT, CAP_REQ;
EMP_PLAN_MES(EMPRESA, PLANTA, MES) : COSTO, X;
ENDSETS
```

Fig. 3: Agrupación de índices y sub-índices.

TABLA VII
ESPECIFICACIÓN DEL NOMBRE DE LOS CONJUNTOS DE DATOS

Nombre de los conjuntos	Nombres	Especificación de los nombres	Dependencia por índice
CAP_AOT	Capacidad a Otorgar	Cantidad de oxígeno que otorga cada tipo de planta	PLANTA
CAPACIDAD	Capacidad Buscada	Capacidad que tendrá con la adquisición de plantas móviles	MES
	CAP_ACT	Capacidad Actual	Capacidad con la que cuenta el hospital
CAP_REQ	Capacidad Requerida	Demanda que se debe cubrir	MES
COSTO	Costo de Alquiler	Costos de alquiler de los tipos de planta de por empresas	EMPRESA, PLANTA Y MES
X	Variables de decisión	Cantidad de planta a alquilar por empresa en cada mes	EMPRESA PLANTA Y MES

Fuente: Elaboración Propia

El objetivo definido fue la suma (comando @SUM) del costo de alquiler de todas las plantas móviles disponibles, esta se obtuvo al multiplicar el conjunto de COSTO con la variable de decisión X. Además, se usó el comando MIN que buscó una combinación que otorga el mínimo valor, esto lo podemos interpretar como el menor costo posible para el pago total de alquiler de plantas de oxígeno por los 4 meses proyectados (Ver Fig. 4).

```
!FUNCIÓN OBJETIVO;
MIN = @SUM(EMP_PLAN_MES(i, j, k) : COSTO(i, j, k) * X(i, j, k));
```

Fig. 4 Función Objetivo que busca minimizar el costo de alquiler

Para conseguir una simulación apegada a la realidad propuesta, se incluyeron las siguientes restricciones (Ver Fig. 5). Las cuales determinaron conjuntamente con la Función Objetivo cuáles valores son los más convenientes para la solución del modelo de programación lineal entera. En la primera restricción, se buscó que la Capacidad Actual con ayuda de la Capacidad de las Plantas que se debió alquilar, lleguen a la Capacidad Buscada. En la segunda, se buscó que esta Capacidad Buscada llegue al valor de la Capacidad Requerida o que se encuentre sobre esta. Por último, en la tercera se hizo

énfasis en que las respuestas entregadas por el modelo, debieron ser números enteros, este paso es muy importante, ya que, si uno de los resultados da un valor decimal, no sería factible porque la planta no puede fraccionarse.

Para la elaboración de estas restricciones se usaron comandos que nos ayudaron a crear las ecuaciones y hacer las sumas dentro de estas, aquellos comandos tienen el nombre de @FOR y @SUM, respectivamente. (Ver Fig. 5)

```
!RESTRICCIONES DE CAPACIDAD DISPONIBLE;
@FOR(MES(k) :
@SUM(EMP_PLAN_MES(i,j,k) : CAP_AOT(j) * X(i,j,k))
      = CAPACIDAD(k) - CAP_ACT(k));

!RESTRICCIONES DE CAPACIDAD REQUERIDA;
@FOR(MES(k) : CAPACIDAD(k) >= CAP_REQ(k));

!DEFINICIÓN DE VARIABLES ENTERAS;
@FOR(EMP_PLAN_MES(i,j,k) : @GIN(X(i,j,k)));
```

Fig. 5 Restricciones y definición de variables enteras.

En la sección DATA se plasmó la información recolectada (Ver Fig. 6). Cada conjunto tiene valores numéricos que se encuentran distribuidos según una matriz del mismo tamaño con la que dependen de la cantidad de índices. Estos datos provienen de las siguientes tablas: Para CAP_AOT (Ver TABLA VI), para CAP_ACT (ver TABLA I), para CAP_REQ (ver TABLA IV), y para COSTO (ver TABLA VI)

```
DATA:
CAP_AOT = 39600, 72000, 144000;
CAP_ACT = 44405, 44405, 44405, 44405;
CAP_REQ = 93662, 77215, 117084, 137194;
COSTO = 16000, 18400, 21160 , 24334 ,
        30000, 34500, 39675 , 45626.25,
        55000, 60500, 66550 , 73205 ,
        15000, 17250, 19837.50, 22813.13,
        30000, 34500, 39675 , 45626.25,
        60000, 66000, 72600 , 79860 ;
ENDDATA
```

Fig. 6: Información de tablas plasmadas en el modelo

Por último, se revisó que los comandos e información ingresada estén correctos para ejecutar el modelo matemático de programación lineal. Como paso final se usó el botón SOLVE.

III. RESULTADOS

Después de ejecutar SOLVE se obtuvo la información de la cantidad que se debe adquirir de cada tipo de planta por cada empresa en un determinado mes (Ver Fig. 7). Para tener una mejor visualización y entendimiento de estos resultados, lo plasmamos en la TABLA V.

X(1, 1, 1)	0.000000
X(1, 1, 2)	0.000000
X(1, 1, 3)	0.000000
X(1, 1, 4)	0.000000
X(1, 2, 1)	0.000000
X(1, 2, 2)	0.000000
X(1, 2, 3)	0.000000
X(1, 2, 4)	0.000000
X(1, 3, 1)	0.000000
X(1, 3, 2)	0.000000
X(1, 3, 3)	0.000000
X(1, 3, 4)	0.000000
X(2, 1, 1)	0.000000
X(2, 1, 2)	1.000000
X(2, 1, 3)	2.000000
X(2, 1, 4)	1.000000
X(2, 2, 1)	1.000000
X(2, 2, 2)	0.000000
X(2, 2, 3)	0.000000
X(2, 2, 4)	1.000000
X(2, 3, 1)	0.000000
X(2, 3, 2)	0.000000
X(2, 3, 3)	0.000000
X(2, 3, 4)	0.000000
Row	Slack or Surplus
1	155364.4

Fig. 7: Respuesta de LINGO sobre la cantidad de plantas para distribución tras ejecutar SOLVE

La TABLA VIII muestra la mejor propuesta a elegir entre las dos empresas. Se puede visualizar que en esta se plasman valores de 0, 1 y 2 hacen referencia a la cantidad de plantas que se van alquilando para un determinado tipo y empresa a la que pertenece; por ejemplo, para el mes 1 se alquilará 1 planta del tipo 2 de la empresa 2, por lo tanto, todos los valores que tengan 0 en la columna Mes 1 significan que no será tomados en el alquiler; o en el caso del Mes 3, solamente tomaremos 2 plantas del tipo 1 de la empresa 2. Luego, con estas cantidades de plantas a alquilar mes a mes también se nos muestra el costo de valor monetario total a invertir durante los 4 meses proyectados, este lo encontramos en la parte inferior de la Fig. 7, dicho valor corresponde a \$155,364.40.

TABLA VIII

CANTIDAD DE PLANTAS A ALQUILAR PARA SATISFACER LA DEMANDA DE OXÍGENO POR MES

Empresa	Planta	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4
Empresa 1	Planta 1	0	0	0	0
	Planta 2	0	0	0	0
	Planta 3	0	0	0	0
Empresa 2	Planta 1	0	1	2	1
	Planta 2	1	0	0	1
	Planta 3	0	0	0	0

Nota: Los valores de "0" significan que no se optó por alquilar dicha planta en algún de los meses.

IV. CONCLUSIÓN

Se logró implementar una solución de distribución de plantas móviles de oxígeno mediante el método de Programación Lineal Entera usando el programa LINGO. Al ejecutar el modelo, este fue capaz de dar el resultado más preciso, después de buscar entre todas las posibles soluciones existentes según las restricciones establecidas. El resultado presentó: Para el primer mes, alquilar una planta de tipo dos; para el segundo mes, una planta de tipo uno, ya que la demanda fue poco elevada; sin embargo, en el mes 3 y 4, dos plantas móviles para cada uno, esto quiere decir, que para esas temporadas se esperó una gran cantidad de personas que se contagien del virus COVID-19 provocando el punto más alto (pico) de demanda de este producto. El modelo arrojó el costo total de \$155,364.40 para el alquiler de las plantas en los 4 meses. Esto se podría utilizar como presupuesto aproximado para estas organizaciones.

Cabe resaltar que la Programación Lineal Entera nos permite crear diferentes escenarios, por ende, puede adaptarse a cualquier centro hospitalario que ya cuente con una planta de distribución de oxígeno medicinal. Aquel, puede ser modificado para ampliar su alcance; considerando una mayor cantidad de propuestas por parte de empresas; o aplicarlo sobre un mayor número de meses. Lo más importante es que brinda una alternativa que incluya tecnología no aplicada en esta situación. Este método es requerido con urgencia porque reducirá tiempo y dinero en la toma de decisiones, además de un impacto colateral en la salud de las personas.

En conclusión, tras el proceso de simulación realizado con el modelo matemático ante la problemática del exceso de la demanda de oxígeno medicinal por parte de los pacientes de COVID-19 frente una inminente segunda ola de contagios. El modelo matemático puede ser adaptado para que sea usado en situaciones similares que se presenten.

REFERENCIAS

- [1] DIGEMID-MINSA. Evaluación de tecnología sanitaria revisión rápida N°05-2020 Oxígeno Medicinal 93% en oxigenoterapia. Lima, agosto de 2020. Recuperado RM_646-2020-MINSA.pdf
- [2] IETSI - EsSalud. Uso de concentradores de oxígeno de uso hospitalario en el contexto de covid-19. Reporte Breve N° 37. Lima-Perú. 2020. Recuperado: http://www.essalud.gob.pe/ietsi/pdfs/covid_19/RB_37_Concentrador_agosto.pdf
- [3] MINSA, Situación Actual COVID19 Peru 2020-2021, Ministerio de Salud, Perú, 2021-02-01. <https://www.dge.gob.pe/portal/docs/tools/coronavirus/coronavirus260121.pdf>
- [4] Rosero R, Posda SL, Ortíz DM. 2011. Programación lineal aplicada a la formulación de raciones para rumiantes. Rev CES Med Vet Zootec. Vol 6 (2): 53-60. Recuperado: R2870_revistaVol6_No2_v3.indd (scielo.org.co)
- [5] OpenCovid-Perú. (s. f.). OpenCovid-Perú: Oxígeno. OpenCovid-Perú. Recuperado 28 de enero de 2021, de <https://opencovid-peru.com/reportes/oxigeno/>

- [6] MINSA, Incremento de positividad a pruebas diagnósticas, casos, defunciones y hospitalizados por COVID-19, Ministerio de Salud, Perú, 2021-02-01. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1545574/Alerta%20epidemiol%C3%B3gica%20N%C2%B0%201.pdf>
- [7] Ramirez, G. Mendez, S. Fuentes, J. (29 de Enero del 2021). Miguel Angel Vizcarra Romero, paciente de covid-19. [Comunicación telefónica].
- [8] Ramirez, G. Mendez, S. Fuentes, J. (29 de Enero del 2021). Atlas Copco Perú S.A.C. proveedores de soluciones industriales. [Comunicación telefónica]