

Modelación económica matemática para la nivelación de los recursos en las reparaciones de la industria azucarera

Modulation Economic Mathematics for the Leveling of the Resources in the Repairs of the Sugar Industry

MSc. Yaritcet Jiménez-Argota^I, yaricet@cug.co.cu; Dr. Cs. Ramón Rodríguez-Betancourt^{II}, ramonrb@eco.uo.edu.cu

^IUniversidad de Guantánamo, Guantánamo, Cuba; ^{II}Facultad de Ingeniería y Tecnología de la Universidad Técnica "Luis Vargas Torres" de Esmeralda, Ecuador

Resumen

La gestión y control de las reparaciones en un central azucarero representan una actividad decisiva para el buen desarrollo y posterior aprovechamiento de la capacidad industrial instalada, pues en dependencia de cómo se ejecute este proceso podrían disminuirse las paradas por roturas imprevistas. El objetivo de la investigación es optimizar el proceso de reparaciones para reducir los costos totales de la industria, mediante la aplicación de un modelo de programación lineal para la nivelación de los recursos: mano de obra directa y materiales. El modelo matemático propuesto para la nivelación de los recursos según el valor de las holguras totales soportados en el cálculo de la pendiente de costo, superan desde la planificación, los valores reales del periodo evaluado, en las paradas por roturas imprevistas, las producciones y los gastos en un 27,5 %, 100,7 % y 4,0 % respectivamente.

Palabras clave: modelación económica — matemática, optimización, sistema informático, nivelación de recursos.

Abstract

The administration and control of the repairs in a sugar represent a decisive activity for the good development and later use of the installed industrial capacity, because in dependence this process is executed of how they could diminish the stops for accidental breaks. The objective of the investigation is to optimize the process of repairs to reduce the total costs of the industry, by means of the application of a model of lineal programming for the leveling of the resources: direct manpower and materials. The mathematical pattern proposed for the leveling of the resources according to the value of the total looseness supported in the calculation of the cost slope, they overcome from the planning, the real values of the evaluated period, in the stops for accidental breaks, the productions and the expenses in 27,5 %, 100,7% and 4 % respectively.

Keywords: modulation economic – mathematics, optimization, computer system, leveling of resources.

Introducción

En los momentos actuales es preciso avanzar a ritmos más acelerados en el perfeccionamiento del proceso de planificación que tiene “como eje central el logro de la eficiencia en nuevas condiciones de la economía y deberá buscar la integridad del plan entre los aspectos del corto, mediano y largo plazo” (PCC, 2011, lineamiento 7), avanzando en sus expresiones financiera y territorial, así como en la planificación empresarial.

Las perspectivas de la industria cubana del azúcar, como parte del proceso de reordenamiento empresarial crecen y se multiplican con proyecciones y planes que abarcan la siembra de la caña, el corte, la producción, hasta la comercialización de sus derivados como parte de una cadena ininterrumpida. A partir de estos preceptos se desarrolla esta investigación en la Unidad Empresarial de Base (UEB) central azucarero “Argeo Martínez” de la provincia Guantánamo.

Las reparaciones, como parte del proceso industrial no desempeñan el papel que le corresponde para lograr la continuidad del proceso productivo, provocando afectaciones económicas en la producción por los altos gastos de mantenimiento frente a las averías una vez comenzada la zafra, afectando así la eficiencia de la industria como se muestran en la tabla 1:

Tabla 1: Cumplimiento plan técnico - económico. Etapa 2011-2013

Indicadores	UM	2010-2011			2011-2012			2012-2013		
		Plan	Real	%	Plan	Real	%	Plan	Real	%
Días de Zafra	u	135	81	32	185	171	92	148	183	124
Caña Molida	t	23 600	22 210	94	28 500	26 750	93	320 611	301 237	94
Aprovechamiento NP ¹	%	72	66	92	78	46	59	70	54	77
Azúcar Física ²	t	22 300	20 000	89	25 740	21 842	84	30 400	24184	79
RPC ³	%	93	90	96	95	83	87	90	75	83
Roturas	hrs	-	122	8	-	791	19	-	512	41
Producción Total	t	20 053	19 190	95	26 515	21 842	82	28 157	24184	86

Fuente: Cumplimiento plan técnico – económico de la UEB central azucarero “Argeo Martínez”

Como se observa, el incumplimiento del plan de producción en las zafras 2011, 2012 y 2013, se vio afectado por el alargamiento e interrupciones en los días de zafras,

¹ Aprovechamiento de la Norma Potencial: es la relación existente entre el azúcar estandarizada a 96° de polarización y la caña molida. Representa la eficiencia Industrial

² Producción de azúcar crudo físico: es el azúcar obtenido del proceso productivo directamente, sin pasar por ningún proceso posterior de purificación y que aún mantiene en los granos la película original de miel. En este indicador se incluye la producción del azúcar blanco directo.

³ RPC: representa el rendimiento potencial de la caña.

motivado por las constantes roturas, fundamentalmente en las áreas de molinos, generación de vapor y cristalización, por la inexistencia de piezas y otros aseguramientos para las reparaciones corrientes, la inestabilidad en el suministro de la caña, además de problemas organizativos debido a una mala planificación de las actividades durante las reparaciones esto provocó el incremento del tiempo perdido de la cosecha, la disminución de la eficiencia industrial y del aprovechamiento del rendimiento potencial de la caña. Todo esto se traduce en un incremento de los costos totales y el deterioro de los parámetros de calidad, resultado más desfavorable para la zafra 2012, situación que presenta mejores resultados en la zafra 2014 con respecto a tres zafras anteriores.

Fundamentación teórica

A partir de la aplicación de la programación reticular para obtener el camino crítico, así como la disminución del costo utilizando las holguras libres, en cada una de las áreas del proceso de producción de azúcar (Jiménez, 2014, 248-260), se plantea, como salida para perfeccionar la gestión del programa de reparaciones, considerar más de una variante de solución, mediante la utilización de la modelación económico – matemática, la cual es factible de utilizar en estos casos pues se cuenta con alternativas de decisión, y existe la posibilidad de creación de la base informativa en la industria.

En atención a este proceso complejo se desarrolla la presente investigación, pues en la gestión del presupuesto de gastos para las reparaciones industriales se debe tener en cuenta los trabajos a realizar en las diferentes áreas y brigadas. Actualmente, el programa de planificación de las reparaciones necesita ser agilizado y controlado eficientemente, cuestión que termina con una deficiente información y datos finales a base de suposiciones, pues no hay tiempo para planificar todo este trabajo en forma manual en la zafra. Por tanto, cualquier disminución en estos costos influye decisivamente en el costo por toneladas de azúcar.

La creciente complejidad de los proyectos actuales ha demandado la necesidad de emplear nuevas técnicas de gestión, con el objetivo de optimizar la eficiencia en su ejecución. La eficiencia, en este caso, implica efectuar la mayor reducción de los costos durante la ejecución del proyecto, a partir de la utilización de los recursos disponibles, (Fernández, 2007).

Uno de los problemas más importantes en el sector de la agroindustria azucarera se encuentra asociado a la búsqueda de soluciones óptimas para la planificación de las reparaciones, que permita disminuir el costo total por este concepto e incrementar el uso racional de los recursos asignados y así aumentar la producción de azúcar (Naranjo, 2010).

Métodos utilizados

En el orden expositivo se parte de lo general a lo particular para llegar a conclusiones específicas, combinando lo lógico y lo histórico; así como la teoría con la práctica, de manera que la identificación de los rasgos esenciales de los fenómenos analizados conduzca a la obtención de resultados generalizadores para la gestión de las reparaciones en la industria azucarera. Se emplea el método sistémico – estructural – funcional en la explicación del objeto de la investigación, la modelación del campo de acción, y la Programación Lineal para la formulación de un modelo de nivelación de recursos y su inserción en la gestión del programa de reparaciones, para determinar la variante de recurso óptima en función de las actividades críticas y no críticas en las reparaciones de la industria, a partir de la aplicación de la programación reticular.

Se elaboran además las fichas de costos para las diferentes alternativas de solución atendiendo al valor de la pendiente de costo y las holguras totales de cada actividad. Se utiliza el programa profesional de computación novedoso HIPERLINDO para abordar la solución del problema.

Resultados y discusión

La aplicación de métodos tradicionales de planificación y gestión no permite lograr la disminución de los gastos totales en la industria, pues la falta de automatización no posibilita analizar una cantidad considerable de situaciones. Esto ha traído aparejado la utilización de métodos y modelos económico – matemáticos por medio de la programación lineal, apoyados en las técnicas de computación que permitan tomar en consideración múltiples variantes de análisis y seleccionar la mejor, de acuerdo con los criterios establecidos (Infante, 2010, 41-460).

Este problema científico se enfrenta a través de la Investigación de Operaciones, con énfasis en la Programación Lineal, para determinar la variante óptima que permita minimizar los costos totales a través de la modelación económica – matemática, que

posibilite la optimización de recursos limitados a partir de un modelo de nivelación de recursos que pueda producir resultados más eficientes que las técnicas tradicionales de la investigación operativa.

Formulación general del problema

Dado la UEB central azucarero “Argeo Martínez”, subordinado a la empresa azucarera Guantánamo, donde se ha obtenido, mediante el método PERT la ruta crítica, para el proyecto de reparaciones en tiempo de no zafra. Se conoce la disponibilidad de recursos existentes para ejecutar las actividades que corresponden al proyecto, y lo que corresponde a cada actividad crítica y no crítica en sus diferentes comienzos, atendiendo a la pendiente de costo de cada actividad, fundamentalmente, fuerza de trabajo y materiales. Son conocidas las diferentes fechas de comienzo de las actividades no críticas a partir de sus holguras totales, así como el costo de cada actividad crítica y o críticas en sus diferentes comienzos.

Con estos elementos el problema sería como distribuir los recursos de fuerza de trabajo y materiales considerados, con el objetivo de disminuir los costos totales del proyecto, a partir del costo mínimo obtenido utilizando las holguras libres de cada actividad.

A esta formulación corresponde el siguiente planteamiento matemático general.

Planteamiento matemático general del modelo de nivelación de recursos

Índices:

i - Actividad;	$i = 1, 2, \dots, m$
j – Comienzo de la actividad;	$j = 1, 2, \dots, n$
k – Tipo de recursos;	$k = 1, 2, \dots, f$
s – áreas	$s = 1, 2, \dots, S$
l – actividades críticas	$l = 1, 2, \dots, L$

Parámetros:

β_{ijks} – consumo del recurso k para la etapa de comienzo j de la actividad i en el área s.

R_{ks} – disponibilidad del recurso k en el área s

C_{ijks} - costo total de la actividad i en el momento de comienzo j con el recurso k en el área s.

S_{ks} - coeficiente de gasto en que incurre la entidad por no tener disponible recurso k en el área s (sobre logro) en las actividades críticas.

V_{ks} - coeficiente de gasto en que incurre la entidad por no tener disponible recurso k en el área s (sobre logro) en las actividades no críticas.

Variables:

X_{ijks} - variable binaria que toma valor 1 si la actividad i comienza en el momento j y consume el recurso k en el área s y cero en caso contrario.

Y_{ks}^+ - sobre logro de recursos k en las actividades críticas en el área s .

Y_{ks}^- - sub logro de recursos k en las actividades críticas en el área s .

D_{ks}^+ - sobre logro de recursos k en las actividades no críticas en el área s .

D_{ks}^- - sub logro de recursos k en las actividades no críticas en el área s .

1) Utilización del recurso k en las actividades críticas.

$$\sum_{i=1}^l \beta_{i1ks} X_{i1ks} + Y_{ks}^- - Y_{ks}^+ = R_{ks} \quad k=1,2,\dots,f \quad s=1,2,\dots,S$$

2) Utilización del recurso k en las actividades no críticas.

$$\sum_{i=l+1}^n \sum_{j=2}^n \beta_{ijk} X_{ijk} + D_{ks}^- - D_{ks}^+ = Y_{ks}^- \quad k=1,2,\dots,f \quad s=1,2,\dots,S$$

3) Respetar la secuencia de actividades críticas

$$X_{i1ks} = 1 \quad k=1,2,\dots,f \quad s=1,2,\dots,S$$

$$X_{i+1,jks} \geq X_{ijk} \quad i=1,2,\dots,l-1 \quad j=1,2,\dots,n \quad k=1,2,\dots,f \quad s=1,2,\dots,S$$

4) Respetar la secuencia de actividades no críticas

$$X_{ijks} \geq X_{ijk+1,s}$$

5) Restricción de unicidad

$$\sum_{j=2}^n X_{ijk} = 1 \quad i=l+1, l+2, \dots, n \quad k=1,2,\dots,f \quad s=1,2,\dots,S$$

6) No negatividad y entero

$$0 \leq X_{ijk} \leq 1 \quad \text{y entero} \quad \forall i, j, k, s$$

Función objetivo

$$\min \sum_{ijks} C_{ijks} X_{ijks} + S_{ks} Y_{ks}^+ + V_{ks} D_{ks}^+$$

La dimensión del modelo estará en dependencia de la cantidad de actividades que conforman el proyecto y los diferentes momentos en que debe iniciar cada una. Esta información es muy relevante pues se puede calcular el número de variables y restricciones para conocer si se tiene capacidad computacional para resolver el problema y tomar las medidas pertinentes. El análisis de las restricciones es el siguiente.

El conjunto de restricciones del grupo 1, indica la utilización del recurso k en las actividades críticas, a partir de la disponibilidad para minimizar el sublogro, garantizando en tiempo su realización, ya que las mismas definen la duración total del proyecto.

El conjunto de restricciones del grupo 2 indica la utilización del recurso k en cada una de las actividades no críticas.

El conjunto de restricciones del grupo 3 indica la secuencia de las actividades para las actividades críticas.

El conjunto de restricciones del grupo 4 indica la secuencia de las actividades para las actividades no críticas, de manera que si se selecciona la actividad i en el momento j=b, para el recurso mano de obra directa, entonces esa misma actividad debe seleccionarse para el consumo de materiales.

La restricción del grupo 5 indica que solo se puede seleccionar una actividad en cada uno de los momentos disponibles.

En la función objetivo se garantiza el cumplimiento del objetivo minimizando los sobre logros y sublogros de recursos, según la disponibilidad existente que se utilizarán para las reparaciones en cada zafra, para no sobrepasar el presupuesto de gasto destinado para este fin.

Con estos elementos el planteamiento matemático desarrollado para el problema de nivelación de recursos para el área de Generación de vapor se presenta a continuación:

Determinación del coeficiente β_{ijks} para la primera restricción, referente a actividades críticas de las áreas s.

$$\sum_{i=1}^l \beta_{ilk_s} X_{ilk_s} + Y_{ks}^- - Y_{ks}^+ = R_{ks} \quad k=1,2,\dots,f \quad s=1,2,\dots,S$$

β_{ijks} , para $j=1$, $k=1$ y $s=1$ en las actividades críticas. Recurso 1 (Mano de obra directa) en el área generación de vapor ($s=1$). Teniendo en cuenta las indicaciones anteriores y tomando como guía el “Manual de fichas de costo”, la investigadora de conjunto con directivos de AZCUBA, técnicos y especialistas de la UEB central azucarero elaboraron las fichas de costos por actividades para las áreas que ocupan el mayor peso en las reparaciones, según los trabajadores directos y las contribuciones correspondientes a cada actividad, para el área de generación de vapor se muestran las actividades críticas en el momento inicial ($j=1$), y no críticas a partir del momento inicial ($j=2$).

**Tabla 2: Total de Mano de obra directa según fichas de costos.
Generación de Vapor. Zafra 2013-2014**

Actividades	Trabajadores Directos	Importe del Mes (\$)	9,09%	14%	20%	Total MOD (\$)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	9	1 150,00	104,53	175,63	215,78	1 645,94
2	8	1 350,00	122,71	206,18	253,31	1 932,20
3	10	1 200,00	109,08	183,27	225,16	1 717,51
4	6	1 520,50	138,21	232,22	285,30	2 176,23
5	7	1 550,00	140,89	236,72	290,08	2 217,69
6	8	1 480,15	134,54	226,06	277,73	2 118,48
7	7	1 280,30	116,38	195,53	240,23	1 832,44
8	12	1 350,54	122,76	206,26	253,41	1 932,97
9	10	1 850,50	168,21	282,62	347,22	2 648,55
10	9	1 800,10	163,63	274,92	337,76	2 576,31
11	8	1 348,00	122,53	190,47	234,01	1 895,01
12	7	1 240,20	112,73	189,41	232,70	1 775,04
13	10	1 450,80	131,88	221,57	272,22	2 076,47
14	8	1 690,30	153,65	258,15	317,16	2 419,26
15	7	1 600,40	145,48	244,42	300,29	2 290,59
16	8	1 690,50	153,66	258,18	317,20	2 419,54
17	9	1 166,70	105,51	177,27	217,79	1 661,27
18	7	1 500,30	136,37	229,13	281,51	2 147,31
19	6	1 200,10	109,09	183,29	225,18	1 717,66
20	8	1 240,15	112,73	189,40	232,70	1 774,98
21	9	1 200,30	109,11	183,32	225,22	1 717,95
22	13	1 480,10	134,54	226,05	277,72	2 118,41
23	7	1 250,80	113,70	191,03	234,69	1 790,22
24	8	1 450,10	128,66	216,17	265,58	2 025,81
25	9	1 150,40	104,57	175,69	215,86	1 646,52
26	8	950,80	86,43	145,21	178,40	1 360,84
27	7	1 480,30	134,60	226,09	277,76	2 118,75
28	12	1 345,15	122,27	205,44	252,40	1 925,26
29	12	1 350,15	122,73	206,20	253,34	1 932,42
Total		40 276,94	3 661,17	6 151,33	7 284,37	57 611,63

En el caso de las actividades críticas, el subíndice j solo toma valor 1, estos coeficientes aparecen resaltados en negritas, los cuales se desglosan a continuación:

$$\beta_{3111}=1717 \quad \beta_{8111}=1933 \quad \beta_{13,111}=2076 \quad \beta_{18,111}=2147 \quad \beta_{22,111}=2118 \quad \beta_{26,111}=1361 \quad \beta_{29,111}=1932$$

β_{ijk_s} , para j=1, k=2 y s=1 en las actividades críticas. Recurso 2 (Materiales)

$$\beta_{3121}=3172 \quad \beta_{8121}=2667 \quad \beta_{13,121}=2723 \quad \beta_{18,121}=2513 \quad \beta_{22,121}=2441 \quad \beta_{26,121}=3089 \quad \beta_{29,121}=2421$$

Para las actividades no críticas se siguió el mismo procedimiento anterior, con respecto al momento más temprano de inicio es decir cuando (j=2), pero con las posibilidades de comienzo en diferentes fechas según la holgura total. Estos resultados para el momento 2 aparecen en la tabla 2 para el recurso uno, el caso del recurso dos fueron extraídos de las fichas de costos referenciadas con anterioridad.

$$\sum_{i=l+1}^n \sum_{j=2}^n \beta_{ijk_s} + D_{ks}^- - D_{ks}^+ = Y_{ks}^-; \quad k=1,2,\dots,f \quad s=1,2,\dots,S$$

β_{ijk_s} , para j=2 en las actividades no críticas. Recurso 1 (Mano de obra directa)

$$\begin{aligned} \beta_{1211}=1646 & \quad \beta_{2111}=1932 & \quad \beta_{4111}=2176 & \quad \beta_{5111}=2218 & \quad \beta_{6111}=2118 \\ \beta_{7111}=1832 & \quad \beta_{9111}=2648 & \quad \beta_{10,111}=2576 & \quad \beta_{11,111}=1895 & \quad \beta_{12,111}=1775 \\ \beta_{14,111}=2419 & \quad \beta_{15,111}=2290 & \quad \beta_{16,111}=2419 & \quad \beta_{17,111}=1661 & \quad \beta_{19,111}=1718 \\ B_{20,111}=1775 & \quad B_{21,111}=1718 & \quad B_{23,111}=1790 & \quad B_{24,111}=2026 & \quad B_{25,111}=1646 \\ B_{27,111}=2119 & \quad B_{28,111}=1925 & & & \end{aligned}$$

β_{ijk_s} , para j=2 en las actividades no críticas. Recurso 2 (Materiales)

$$\begin{aligned} \beta_{1221}=3254 & \quad \beta_{2221}=3168 & \quad \beta_{4221}=2824 & \quad \beta_{5221}=2582 & \quad \beta_{6221}=2661 \\ \beta_{7221}=2767 & \quad \beta_{9221}=1851 & \quad \beta_{10,221}=1874 & \quad \beta_{11,221}=2555 & \quad \beta_{12,221}=2805 \\ \beta_{14,221}=2101 & \quad \beta_{15,221}=2309 & \quad \beta_{16,221}=2380 & \quad \beta_{17,221}=3189 & \quad \beta_{19,221}=2612 \\ B_{20,221}=2595 & \quad B_{21,221}=2712 & \quad B_{23,221}=2640 & \quad B_{24,221}=2624 & \quad B_{25,221}=3003 \\ B_{27,221}=2331 & \quad B_{28,221}=2515 & & & \end{aligned}$$

Determinación de los coeficientes β_{ijks} para j mayor que dos

El periodo de duración de actividad se puede incrementar también con el empleo de las holguras totales, que representa el tiempo máximo que puede retrasarse una actividad sin afectar la duración total del proyecto, esto significa que se deba utilizar menos fuerza de trabajo y, por ende, se disminuyen los costos. Esta situación, apoyado en la pendiente de costo se presenta en la tabla 3.

**Tabla 3: Disminución del Costo Total utilizando la holgura Total.
Mano de obra directa Generación de vapor. Zafra 2013-2014**

Actividades	H_{ij}^L (días)	H_{ij}^T Disponibles (días)	H_{ij}^T A consumir (días)	Variación MOD (\$)	Variación Costo Total (\$)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	0	4	4	895,57	4 149,63
2	0	13	13	235,68	3 403,48
3	0	0	0	1 717,51	4 890,00
4	0	14	14	272,66	3 096,43
5	0	14	14	314,80	2 897,11
6	3	13	10	420,00	3 081,52
7	0	10	10	401,18	3 168,74
8	0	0	0	1 932,97	4 600,00
9	0	14	14	644,78	2 496,23
10	1	15	14	348,62	2 222,31
11	0	10	10	755,70	3 310,70
12	0	5	5	834,50	3 639,46
13	0	0	0	2 076,47	4 800,00
14	6	14	8	1 073,87	3 174,61
15	0	8	8	1 145,58	3 454,99
16	0	5	5	1 622,12	4 002,58
17	1	6	5	766,72	3 955,45
18	0	0	0	2 147,31	4 660,00
19	0	8	8	687,14	3 299,48
20	0	5	5	1 052,79	3 647,81
21	1	6	4	1 038,09	3 750,14
22	0	0	0	2 118,41	4 560,00
23	1	8	7	569,72	3 209,50
24	0	7	7	965,21	3 589,40
25	0	5	5	930,77	3 934,25
26	0	0	0	1 360,84	4 450,00
27	7	7	7	675,57	3 006,82
28	5	5	5	953,68	3 468,42
29	0	0	0	1 932,42	4 354,00
Total				29 890,68	106 273,06
Disminución (%)				48,1	20,3

Teniendo en cuenta que las actividades no críticas utilizaron las holguras libres en su totalidad (columna 2), podrán consumir solo una parte de las holguras totales

disponibles (columna 3), de esta forma fueron confeccionadas las nuevas fichas de costos consumiendo las holguras totales en diferentes momentos según la cantidad de días de holguras totales a consumir (columna 4), obteniéndose de este modo la disminución de la Mano de Obra directa (columna 5), de acuerdo con la fecha de comienzo de las actividades no críticas.

A partir estos valores se obtienen los coeficientes β_{ijks} , para j mayor que dos con recurso 1 (Mano de obra directa). Estos coeficientes coinciden con los costos de materiales cuando j=1 descritos anteriormente, para los diferentes momentos en que pueden ser efectuadas las reparaciones.

Función objetivo

$$\min \sum_{ijks} C_{ijks} X_{ijks} + S_{ks} Y_{ks}^+ + V_{ks} D_{ks}^+$$

C_{ijks} – Costo de la actividad i en el momento de comienzo j con el recurso k, en el área de reparaciones s. A partir de la tabla 3 columna 5, fueron obtenidos los coeficientes de los costos totales para j=1 de cada una de las actividades críticas, para los dos recursos considerados los que se desglosan a continuación.

$C_{3111}=1718$	$C_{3121}=3172$	$C_{8111}=1933$	$C_{8121}=2667$	$C_{13,111}=2076$	$C_{13,121}=2724$	$C_{18,111}=2147$
$C_{18,121}=2513$	$C_{22,111}=2118$	$C_{22,121}=2442$	$C_{26,111}=1361$	$C_{26,121}=3089$	$C_{29,111}=1932$	$C_{26,121}=2422$

Para las actividades no críticas cuando j=2 los costos totales son los siguientes:

$C_{1211}=1646$	$C_{1221}=3254$	$C_{2211}=1932$	$C_{2221}=3168$	$C_{4211}=2176$	$C_{4221}=2824$
$C_{5211}=2218$	$C_{5221}=2582$	$C_{6211}=2118$	$C_{6221}=2662$	$C_{7211}=1832$	$C_{7221}=2767$
$C_{9211}=2649$	$C_{9221}=1851$	$C_{10,211}=2576$	$C_{10,221}=1874$	$C_{11,211}=1895$	$C_{11,221}=2555$
$C_{12,211}=1775$	$C_{12,221}=2805$	$C_{14,211}=2419$	$C_{14,221}=2101$	$C_{15,211}=2291$	$C_{15,221}=2309$
$C_{16,211}=2420$	$C_{16,221}=2380$	$C_{17,211}=1661$	$C_{17,221}=3188$	$C_{19,211}=1718$	$C_{19,221}=2612$
$C_{20,211}=1775$	$C_{20,221}=2595$	$C_{21,211}=1718$	$C_{21,221}=2712$	$C_{23,211}=1790$	$C_{23,221}=2640$
$C_{24,211}=2026$	$C_{24,221}=2624$	$C_{25,211}=1647$	$C_{25,221}=3003$	$C_{27,211}=2119$	$C_{27,221}=2331$
$C_{28,211}=1925$	$C_{28,221}=2515$				

C_{ijks} – Costo total de las reparaciones para j mayor que 2 en las actividades no críticas con los recursos uno:

Momentos	1	2	4	5	6	7
j=3	$C_{1311}=896$ $C_{1321}=3254$	$C_{2311}=1410$ $C_{2321}=3168$	$C_{4311}=1632$ $C_{4321}=2824$	$C_{5311}=1675$ $C_{5321}=2582$	$C_{6311}=1439$ $C_{6321}=2662$	$C_{7311}=1260$ $C_{7321}=2767$
j=4		$C_{2411}=888$ $C_{2421}=3168$	$C_{4411}=1088$ $C_{4421}=2824$	$C_{5411}=1131$ $C_{5421}=2582$	$C_{6411}=760$ $C_{6421}=2662$	$C_{7411}=695$ $C_{7421}=2767$
j=5		$C_{2511}=496$ $C_{2521}=3168$	$C_{4511}=680$ $C_{4521}=2824$	$C_{5511}=723$ $C_{5521}=2582$	$C_{6511}=420$ $C_{6521}=2662$	$C_{7511}=401$ $C_{7521}=2767$

j=6		C ₂₆₁₁ =236	C ₄₆₁₁ =272	C ₅₆₁₁ =315		
		C ₂₆₂₁ =3168	C ₄₆₂₁ =2824	C ₅₆₂₁ =2582		
	9	10	11	12	14	15
j=3	C ₉₃₁₁ =2076	C _{10,311} =1940	C _{11,311} =1459	C _{12,311} =1023	C _{14,311} =1746	C _{15,311} =1718
	C ₉₃₂₁ =1851	C _{10,321} =1874	C _{11,321} =2555	C _{12,321} =2805	C _{14,321} =2101	C _{15,321} =2309
j=4	C ₉₃₁₁ =1504	C _{10,411} =1303	C _{11,411} =989	C _{12,411} =834	C _{14,411} =1074	C _{15,411} =1146
	C ₉₃₂₁ =1851	C _{10,421} =1874	C _{11,421} =2555	C _{12,421} =2805	C _{14,421} =2101	C _{15,421} =2309
j=5	C ₉₅₁₁ =931	C _{10,511} =667	C _{11,511} =756			
	C ₉₅₂₁ =1851	C _{10,511} =1874	C _{11,521} =2555			
j=6	C ₉₆₁₁ =645	C _{10,611} =348				
	C ₉₆₂₁ =1851	C _{10,621} =1874				
	16	17	19	20	21	23
j=3	C _{16,311} =1782	C _{17,311} =946	C _{19,311} =1203	C _{20,311} =1202	C _{21,311} =1038	C _{23,311} =1093
	C _{16,321} =2380	C _{17,321} =3189	C _{19,321} =2612	C _{20,321} =2595	C _{21,321} =2712	C _{23,321} =2640
j=4	C _{16,411} =1622	C _{17,411} =767	C _{19,411} =687	C _{20,411} =1053		C _{23,411} =570
	C _{16,421} =2380	C _{17,421} =3189	C _{19,411} =2612	C _{20,421} =2595		C _{23,411} =2640
	24	25	27	28		
j=3	C _{24,311} =1420	C _{25,311} =1074	C _{27,311} =1292	C _{28,311} =1342		
	C _{24,321} =2624	C _{25,321} =3003	C _{27,321} =2331	C _{28,321} =2515		
j=4	C _{24,411} =965	C _{25,411} =931	C _{27,411} =676	C _{28,411} =954		
	C _{24,411} =2624	C _{25,421} =3003	C _{27,421} =2331	C _{28,421} =2515		

Solución del modelo a través del programa HIPERLINDO. Interpretación de los resultados

El modelo planteado tiene 176 variables y 140 restricciones, la solución óptima se obtiene en la iteración número 86, con un costo mínimo de 102 860,00 pesos, resultado que comparado con el costo de las reparaciones para el área de Generación de Vapor para la zafra 13-14 brinda un ahorro de 31 044 pesos, que representa un 23 %.

De una disponibilidad de mano de obra directa de 30 000 pesos, se consumió 13 285 pesos, para un sobrante de 16 715 pesos, que pasan a las actividades no críticas. Para las actividades no críticas en mano de obra directa se consumieron 15 850 pesos para un sobrante de 865 pesos, lo que indica que el central todavía tiene reservas en cuanto a la mano de obra directa se refiere. En cuanto al consumo material para las actividades críticas se consumieron 19 029 pesos para un sobrante de 15 971 pesos, que pasan a las actividades no críticas, las que son consumidas totalmente, no existiendo sobrantes por este concepto.

En sentido general, el modelo selecciona el momento de comienzo de la actividad que tiene el menor costo de mano de obra directa, teniendo en cuenta la restricción de unicidad, por ejemplo la actividad dos, que no es crítica, tiene 13 días de holgura, significa que puede comenzar en 16, 20, 23, o 25 días a partir de la fecha más temprana de inicio, la fecha seleccionada por el modelo es comenzarla en 25 días, ya que produce menor costo de los recursos mano de obra y materiales.

La restricción de secuencia de las actividades se cumple para las actividades críticas y para las actividades no críticas, obliga a escoger la fecha de comienzo de la restricción de consumo material correspondiente a la restricción de mano de obra directa. El ahorro producido tiene un impacto en el costo por tonelada de azúcar de 1,13 pesos por toneladas de azúcar a producir para el área de Generación de vapor. El modelo fue aplicado también a las áreas Planta moledora y cristalización.

Análisis económico

El análisis económico de la solución está enfocado hacia la comparación de los resultados obtenidos respecto a lo presupuestado una vez implementado y validado el modelo propuesto para la planificación de las reparaciones en la zafra 2013-2014 de las áreas Planta Moledora, Cristalización y Generación de Vapor, los resultados se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Disminución de los Costos Totales de reparaciones a partir de la aplicación de la modelación económica- matemática Zafra 2013-2014

Centro de costo	Costo Total planificado (\$)	Disminución Costo Total (\$)	%
Planta Moledora	133 904,00	120 139,00	10
Cristalización	117 835,00	107 255,00	9
Generación de Vapor	133 904,00	102 860,00	23
Sub total	892 694,31	837 305,32	7
Total para la industria	1 328 963,90⁴	1 273 574,90⁵	4

Fuente: Elaboración de la autora a partir de la disponibilidad de los recursos: mano de obras y materiales según indicaciones del grupo nacional AZCUBA

Estos resultados muestran una disminución de 55 389,00 pesos que representa el 4 % de los costos totales de la industria para estas tres áreas en la zafra 2013-2014, con resultado más significativos para el área Generación de vapor, todo lo cual contribuyó notablemente al cumplimiento del plan técnico económico para la zafra 2013-2014 como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5: Cumplimiento plan técnico - económico. Zafra 2013-2014

Indicadores	UM	Plan	Real	%
Días de Zafra	u	136	144	8
Caña Molida	t	30 200	29 950	99
Aprovechamiento NP	%	76	65	85
Azúcar Física	t	26 453	27 818	105,1
Aprovechamiento RPC	%	70	85	121,4
Roturas ⁶	hrs	-	280	27,5
Producción Total	t	27 611	27 818	100,7

Fuente: Informes finales de zafras. Departamento de planificación y estadística. Empresa Azucarera Guantánamo

⁴ Dato procedente de la asignación de recursos para las reparaciones, que representa el total de costos para las reparaciones de la industria en la zafra 2013-2014, según la instrucción 8/2013 del grupo AZCUBA.

⁵ Dato que representa la disminución del costo total de las reparaciones luego de la aplicación de la modelación económica para la zafra 2013-2014.

⁶ Representa el tiempo perdido por roturas e interrupciones y es calculado sobre la base del tiempo total de zafra.

A partir de la implementación y validación del modelo en la UEB se logra reducir las paradas por roturas imprevistas a 280 hrs, para un 27,5 % del tiempo perdido por concepto de roturas para la zafra 2013-2014, 14 % menos que la zafra anterior, revelando un sobrecumplimiento de la producción total de 0,7 % y de otros indicadores de eficiencia del central, que aunque se consideren aun discretos son favorables para la UEB, respecto a resultados en zafras anteriores. De esta forma queda demostrado que la modelación económica matemática y con ella la nivelación de recurso constituyen instrumentos eficientes para la gestión de las reparaciones en el central.

Conclusiones

- 1. La utilización de la modelación económica – matemática para la nivelación de los recursos, resuelto mediante el sistema informático profesional HIPERLINDO y su solución validada por la UEB central azucarero "Argeo Martínez", ofreciendo variantes de solución, imposibles de obtener por métodos tradicionales.*
- 2. Al aplicar la disminución de los costos mediante la utilización de las holguras totales se demuestra que con una adecuada gestión de las actividades durante las reparaciones pueden obtenerse mejores resultados respecto a lo planificado, complementado la eficiencia del sistema automatizado MAINPACK habilitado para este fin en la industria.*
- 3. El indicador costo total de las reparaciones disminuye en un 4,0 % con respecto a lo planificado para la zafra 2014. El ahorro producido tiene un impacto en el costo por tonelada de azúcar de 1,13 pesos para el área de Generación de vapor, logrando reducir las paradas por roturas imprevistas en un 14 % menos que la zafra anterior, revelando un sobre cumplimiento de la producción total de 0,7%, lo cual satisface los objetivos de la investigación.*

Referencias bibliográficas

1. Fernández Arias, Fernando Enrique. (2007). *Modelación económico – matemática y sistemas informáticos para la optimización de la cosecha de la caña en las provincias Santiago de Cuba y Granma*. Tesis en opción al título de Doctor en Ciencias Económicas. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.
2. Infante Roblejo, Ramiro. (2010), "Optimización de las vinculaciones cañeras dentro y entre centrales azucareros". *ATAC*, 60, enero – junio, pp. 41-46

3. Jiménez Argota, Yaritcet .(2014). “Optimización del proceso de reparaciones en la UEB central azucarero «Argeo Martínez», de la provincia de Guantánamo, mediante la programación reticular”. *Anuario de la Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales de la Universidad de Oriente*, 5, p. 248- 260.
4. Partido Comunista de Cuba. (2011). *Lineamientos de la Política Económica y Social del partido y la Revolución*.
5. Naranjo López, José Antonio. (2010). *Determinación de la estructura óptima de variedades y cepas en empresas azucareras seleccionadas del territorio oriental*. Tesis en opción al título de Doctor en Ciencias Económicas. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.