

Decisión multicriterio: Elección de la mejora más óptima para su implementación en un equipo de Formula Student

Laura Mayorgas del Castillo

Índice

Introducción	2
Criterios	2
Mejoras	4
AHP	6
Método I: Funciones de clase	8
Método II	9
Diagrama Jerarquías	9
Paquete AHP	10
ELECTRE	12
PROMETHEE	14
PROMETHEE I	14
PROMETHEE II	14
PROMETHEE I (medias)	15
PROMETHEE II (medias)	16
Resolución con Promethee Windows	17
Conclusion	18

Introducción

La Formula Student es la competición más prestigiosa a nivel ingenieril del mundo. Es por eso que los distintos equipos buscan continuamente mejoras que optimicen el rendimiento de sus monoplazas. Sin embargo, debido a los recursos limitados y múltiples amplio abanico de mejoras, elegir la más adecuada es un desafío. Este trabajo propone un enfoque de decisiones multicriterio para identificar la mejora óptima, evaluando factores como el rendimiento, el costo y el peso.



Figura 1: ART-24 D

ARUS es el equipo de Formula Student de la Universidad de Sevilla y del cual vamos a realizar el trabajo.
(*ARUS web*)

Criterios

Para la elección de la mejora más óptima tenemos que tener en cuenta distintos criterios, en este caso los hemos resumidos en los siguientes 6.

1. Peso Total del Monoplazas

Este criterio afecta directamente en la aceleración y frenado del monoplazas, además también tiene un impacto directo en el comportamiento de este en las curvas. Es un criterio *desfavorable* en el sentido de que queremos minimizar el peso.

2. Coste de Fabricación

Al tratarse de un equipo de universidad disponemos de un límite presupuestario, por lo que siempre buscamos una opción económica y asequible. También es un criterio en el que buscaremos el *mínimo*.

3. Fiabilidad y Seguridad

Valorar la robustez de la mejora propuesta y su impacto en la seguridad del piloto, asegurando que el cambio no comprometa la durabilidad del vehículo ni los estándares de seguridad, todo debe cumplir las reglas que la competición de Alemania (FSG) determina. (*enlace a la normativa*).

4. Innovación

Este criterio considera el grado de creatividad y originalidad de la mejora, su potencial para introducir tecnologías o conceptos innovadores y la posibilidad de marcar la diferencia en la competición con un diseño único y eficiente. Existe un premio específico para el equipo más innovador de la temporada.

5. Evaluación de riesgos

Análisis de los riesgos técnicos y operativos asociados a la implementación de las distintas mejoras. Se consideran posibles fallos o problemas que puedan surgir, así como el impacto que podrían tener en el rendimiento o la seguridad del vehículo. Se requiere establecer un plan de gestión de riesgos para mitigar los efectos adversos y reducir la probabilidad de problemas en competencia.

6. Sostenibilidad

La sostenibilidad es cada vez más importante en el mundo actual esto se ve reflejado en la competición de Formula Student. Este criterio evalúa el impacto ambiental de los materiales, procesos y recursos utilizados para implementar las mejoras en estudio. Se priorizarán materiales reciclables y técnicas de fabricación ecoeficientes, buscando reducir la huella de carbono.

Mejoras

Serán las alternativas que evaluaremos en cada uno de los criterios que hemos mencionado anteriormente. Veamos estas de forma detallada.

1. Monocasco

Durante la temporada 24 y anteriormente en el equipo siempre se ha realizado un meneplazas cuyo chasis era tubular.

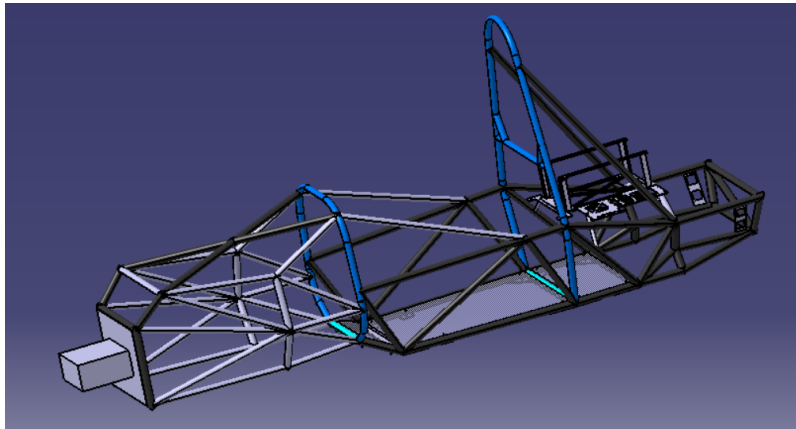


Figura 2: ART-24 D Chasis Tubular

Consiste en una red de tubos de acero o aluminio soldados entre sí.

Se está planteando la opción de cambiar el diseño de este chasis a un monocasco, siguiendo la tendencia adoptada por varios equipos de Formula Student. Al adoptar un chasis monocasco, no solo reducimos significativamente el peso del vehículo, sino que también incrementamos la rigidez estructural, lo cual mejora el comportamiento dinámico del mismo.

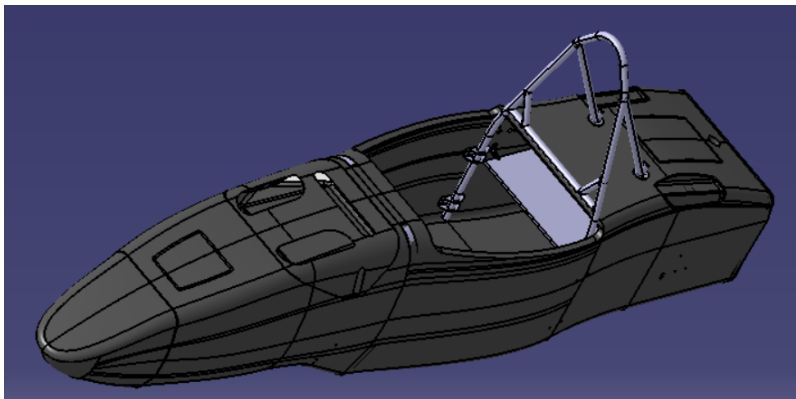


Figura 3: ART-25 D Monocasco

2. Tracción a las 4 rueda

Conocido en adelante como 4WD(Four Wheel Drive). Consiste en lugar de tener un único motor, colocar uno en cada rueda. Este cambio mejorará la aceleración, el control y la estabilidad en curvas al distribuir la potencia en las cuatro ruedas, optimizando el agarre en cualquier condición de pista.

3. Optimización de la batería



Figura 4: Estructura de un 4WD

Cambio de celdas, antes eran cilíndricas y se pretende pasar a las que se pueden ver en la derecha, estas ocupan mucho menos sitio haciendo que el computo general de la batería tenga un peso menor al de la temporada de 2024. Además de un cambio en la configuración de la misma.



24D cells



25D cells

Figura 5: Celdas batería

4. Telemetría

Sistema de monitorización en tiempo real que recolecta y transmite los datos de los distintos componentes del vehículo hacia una estación remota, permitiendo detectar posibles problemas en directo. Además de la necesidad de conectar un sensor proporcionado por la misma competición llamado *dattalogger* que recoge todo estos datos.

5. Diseño de Nuevas Aletas y Difusores para Aerodinámica Busca optimizar el flujo de aire alrededor del vehículo para mejorar el agarre y la estabilidad. Este sistema se centra en controlar la distribución de fuerzas aerodinámicas, aumentando la eficiencia y el rendimiento.

AHP

En primer lugar vamos a hacer una matriz que contenga la información al comparar los distintos *criterios*:

```
criterios= c ("Peso","Coste","Fiabilidad","Innovación","Riesgo","Sostenibilidad")
tablacriterios= multicriterio.crea.matrizvaloraciones_mej(
  c(1/2,2,7,4,6,4,9,6,7,5,2,4,1/4,1/2,2), numalternativas = 6, v.nombres.alternativas = criterios)
```

	Peso	Coste	Fiabilidad	Innovación	Riesgo	Sostenibilidad
Peso	1.00	0.50	2.00	7	4.00	6.0
Coste	2.00	1.00	4.00	9	6.00	7.0
Fiabilidad	0.50	0.25	1.00	5	2.00	4.0
Innovación	0.14	0.11	0.20	1	0.25	0.5
Riesgo	0.25	0.17	0.50	4	1.00	2.0
Sostenibilidad	0.17	0.14	0.25	2	0.50	1.0

Ahora se hará una matriz para cada uno de los criterios haciendo comparaciones dos a dos sobre las distintas alternativas y ver cual es preferible a cual, buscando siempre respetar la relación de coherencia.

(Nota: Se ocultará el código en la creación del resto de matrices para no sobrecargar la presentación del documento. Se hace de la misma forma para las distintas alternativas obteniendo las siguientes matrices.)

- **Peso Total del Monoplazas**

	Monocasco	4WD	Batería	Telemetría	Aerodinámica
Monocasco	1.00	2.00	7.0	9	3.00
4WD	0.50	1.00	4.0	6	2.00
Batería	0.14	0.25	1.0	2	0.50
Telemetría	0.11	0.17	0.5	1	0.17
Aerodinámica	0.33	0.50	2.0	6	1.00

- **Coste de Fabricación**

	Monocasco	4WD	Batería	Telemetría	Aerodinámica
Monocasco	1	1	0.12	0.17	0.33
4WD	1	1	0.12	0.14	0.33
Batería	8	8	1.00	2.00	6.00
Telemetría	6	7	0.50	1.00	2.00
Aerodinámica	3	3	0.17	0.50	1.00

- **Fiabilidad y seguridad**

	Monocasco	4WD	Batería	Telemetría	Aerodinámica
Monocasco	1	0.14	0.25	0.11	0.5
4WD	7	1.00	2.00	0.50	6.0
Batería	4	0.50	1.00	0.33	2.0
Telemetría	9	2.00	3.00	1.00	6.0
Aerodinámica	2	0.17	0.50	0.17	1.0

- **Innovación**

	Monocasco	4WD	Batería	Telemetría	Aerodinámica
Monocasco	1.00	4.00	4.0	2.00	8
4WD	0.25	1.00	1.0	0.50	4
Batería	0.25	1.00	1.0	0.50	2
Telemetría	0.50	2.00	2.0	1.00	7
Aerodinámica	0.12	0.25	0.5	0.14	1

- **Evaluación de riesgo**

	Monocasco	4WD	Batería	Telemetría	Aerodinámica
Monocasco	1.00	0.50	0.25	0.17	3
4WD	2.00	1.00	0.50	0.17	4
Batería	4.00	2.00	1.00	0.50	7
Telemetría	6.00	6.00	2.00	1.00	9
Aerodinámica	0.33	0.25	0.14	0.11	1

- **Sostenibilidad**

	Monocasco	4WD	Batería	Telemetría	Aerodinámica
Monocasco	1.0	0.50	2	0.17	0.33
4WD	2.0	1.00	3	0.20	0.33
Batería	0.5	0.33	1	0.11	0.14
Telemetría	6.0	5.00	9	1.00	2.00
Aerodinámica	3.0	3.00	7	0.50	1.00

Método I: Funciones de clase

Mayor autovalor

Pesos locales Pesos locales

```
wcriterios = multicriterio.metodoAHP.variante1.autovectormayorautovalor(tablacriterios)
```

Nota: De forma análoga para todos los criterios

Pesos globales

	Peso	Coste	Fiabilidad	Innovación	Riesgo	Sostenibilidad	Ponderadores Globales
Monocasco	0.4608320	0.0484112	0.0402210	0.4552562	0.0778100	0.0777909	0.1713257
4WD	0.2651618	0.0471231	0.2981724	0.1315964	0.1250372	0.1161993	0.1530664
Batería	0.0717638	0.5050463	0.1468665	0.1138140	0.2592887	0.0421870	0.2850374
Telemetría	0.0389876	0.2748927	0.4462209	0.2543017	0.5014277	0.4876634	0.2666804
Aerodinámica	0.1632547	0.1245266	0.0685192	0.0450316	0.0364364	0.2761594	0.1238901
Ponder.Criterios	0.2610911	0.4311056	0.1458476	0.0309163	0.0833950	0.0476445	NA

Media geométrica

Pesos locales

```
wcriterios = multicriterio.metodoAHP.variante2.mediageometrica(tablacriterios)
```

Nota: De forma análoga para todos los criterios

Pesos globales

	Peso	Coste	Fiabilidad	Innovación	Riesgo	Sostenibilidad	Ponderadores Globales
Monocasco	0.4614731	0.0489482	0.0404317	0.4558541	0.0780410	0.0777854	0.1728015
4WD	0.2658828	0.0474621	0.2963860	0.1309097	0.1252936	0.1154421	0.1539889
Batería	0.0723130	0.4994378	0.1486605	0.1139635	0.2645932	0.0423111	0.2819368
Telemetría	0.0385774	0.2792924	0.4459814	0.2549197	0.4959776	0.4880127	0.2675508
Aerodinámica	0.1617536	0.1248595	0.0685405	0.0443529	0.0360946	0.2764487	0.1237220
Ponder.Criterios	0.2639918	0.4273685	0.1469605	0.0304653	0.0833707	0.0478432	NA

Método básico

Pesos locales

```
wcriterios = multicriterio.metodoAHP.variante3.basico(tablacriterios)
```

nota: De forma análoga para todos los criterios

Pesos globales

	Peso	Coste	Fiabilidad	Innovación	Riesgo	Sostenibilidad	Ponderadores Globales
Monocasco	0.4594969	0.0492163	0.0405810	0.4544840	0.0802433	0.0787052	0.1716752
4WD	0.2641450	0.0479663	0.2974166	0.1318028	0.1266771	0.1173364	0.1537714
Batería	0.0719139	0.4976963	0.1480476	0.1136210	0.2621637	0.0426065	0.2806782
Telemetría	0.0393869	0.2792111	0.4443060	0.2545147	0.4936864	0.4856367	0.2688390
Aerodinámica	0.1650573	0.1259099	0.0696488	0.0455775	0.0372296	0.2757151	0.1250362
Ponder.Criterios	0.2603077	0.4259606	0.1472125	0.0316371	0.0857341	0.0491481	NA

Conclusión: Podemos ver que independientemente del método de cálculo de los pesos locales la mejora más óptima para implementar es **Optimización de la batería** con un peso global aproximadamente de:

- Método mayor autovalor: 28,503%
- Media geométrica: 28,193%
- Método básico: 28,065%

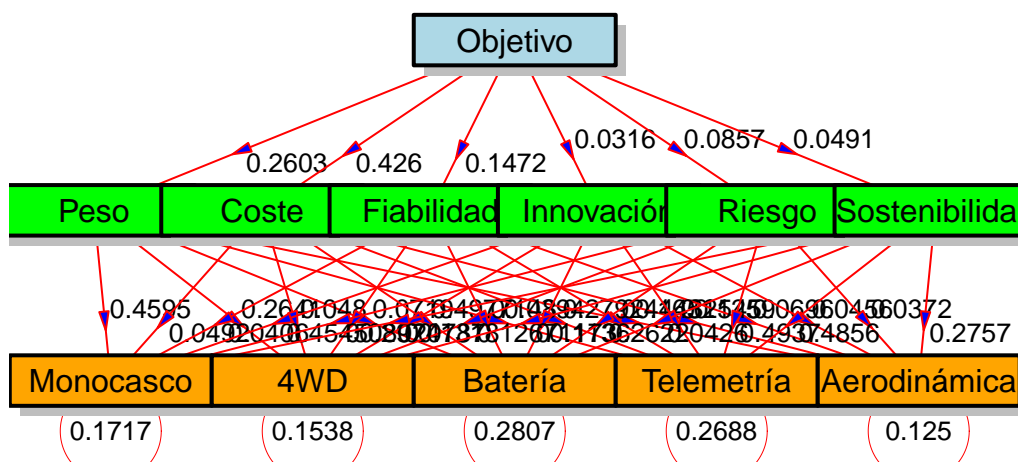
Además se verifica que para todos los criterios la mejora menos óptima es la de diseño de nuevas aletas y difusores para la **Aerodinámica** del monoplaza.

Método II

	Peso	Coste	Fiabilidad	Innovación	Riesgo	Sostenibilidad	Ponderadores Globales
	0.4594969	0.0492163	0.0405810	0.4544840	0.0802433	0.0787052	0.1716752
	0.2641450	0.0479663	0.2974166	0.1318028	0.1266771	0.1173364	0.1537714
	0.0719139	0.4976963	0.1480476	0.1136210	0.2621637	0.0426065	0.2806782
	0.0393869	0.2792111	0.4443060	0.2545147	0.4936864	0.4856367	0.2688390
	0.1650573	0.1259099	0.0696488	0.0455775	0.0372296	0.2757151	0.1250362
Ponder.Criterios	0.2603077	0.4259606	0.1472125	0.0316371	0.0857341	0.0491481	NA

Diagrama Jerarquías

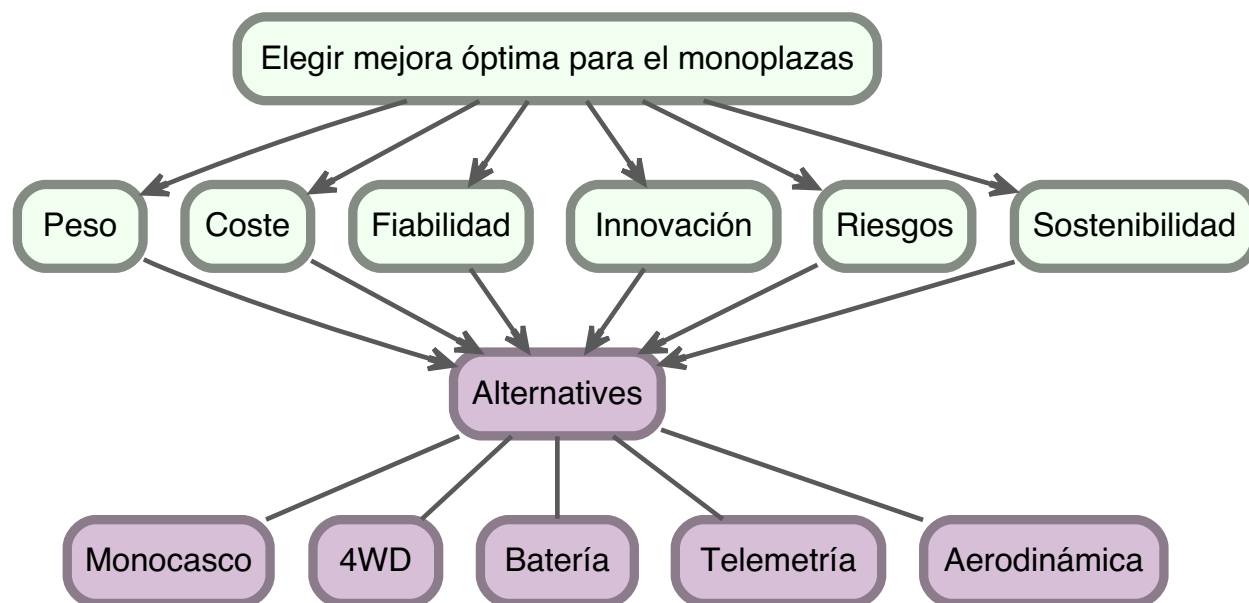
Estructura Jerárquica (AHP)



No se ve de forma muy clara en este diagrama ya que está toda la información muy condensada. Pero puede leerse bajo cada una de las alternativas el peso global que tiene cada una en la decisión final y podemos ver que la mejora más óptima para ser implementada según este método es mejorar la configuración de la **Batería**.

Paquete AHP

Podemos ver un primer gráfico con forma de árbol que muestra el objetivo que se persigue en este trabajo, los distintos criterios que se tienen en cuenta para tomar esta elección y las distintas alternativas que pueden llevarse a cabo:



Para la resolución con este método hace falta tener los datos en un fichero con extensión **.ahp** que puede encontrarse en el repositorio de GitHub.

Este paquete calcula y genera las siguientes salidas en forma de tablas:

Contribución total

	Weight	Batería	Telemetría	Monocasco	4WD	Aerodinámica	Inconsistency
Elegir mejora óptima para el monoplaza	100.0%	28.5%	26.7%	17.1%	15.3%	12.4%	2.3%
Coste	43.1%	21.8%	11.9%	2.1%	2.0%	5.4%	1.8%
Peso	26.1%	1.9%	1.0%	12.0%	6.9%	4.3%	1.5%
Fiabilidad	14.6%	2.1%	6.5%	0.6%	4.3%	1.0%	1.3%
Riesgos	8.3%	2.2%	4.2%	0.6%	1.0%	0.3%	2.6%
Sostenibilidad	4.8%	0.2%	2.3%	0.4%	0.6%	1.3%	1.3%
Innovación	3.1%	0.4%	0.8%	1.4%	0.4%	0.1%	1.5%

Pesos locales

	Priority	Batería	Telemetría	Monocasco	4WD	Aerodinámica	Inconsistency
Elegir mejora óptima para el monoplazas	100.0%						2.3%
Coste	43.1%	50.5%	27.5%	4.8%	4.7%	12.5%	1.8%
Peso	26.1%	7.2%	3.9%	46.1%	26.5%	16.3%	1.5%
Fiabilidad	14.6%	14.7%	44.6%	4.0%	29.8%	6.9%	1.3%
Riesgos	8.3%	25.9%	50.1%	7.8%	12.5%	3.6%	2.6%
Sostenibilidad	4.8%	4.2%	48.8%	7.8%	11.6%	27.6%	1.3%
Innovación	3.1%	11.4%	25.4%	45.5%	13.2%	4.5%	1.5%

Análisis de las Tablas AHP

- Contribución Total de los Criterios

La primera tabla muestra la contribución total de cada criterio en la selección de la mejora óptima para el monoplaza. El criterio con mayor peso es:

Coste (43.1%): Es el criterio más importante, con una alta prioridad en general. En este criterio, la opción de “Batería” lidera, contribuyendo con el 50.5% de peso para que esta alternativa se posicione como la más óptima. Lo que refleja la relevancia de este aspecto en un contexto universitario con recursos limitados.

De forma similar puede verse esto para el resto de criterios hasta llegar al criterio con menor peso que es la innovación con tan solo un 3.1%.

Los valores de inconsistencia son bajos, entre el 1.3% y 2.3%, lo que indica que las evaluaciones y comparaciones dentro de cada criterio se hecho de manera coherente.

- Pesos Locales por Criterio

En la segunda tabla, se detallan los pesos locales, que reflejan la importancia de cada opción dentro de cada criterio específico. Cabe destacar de forma similar a la anterior interpretación, en el criterio Coste: La opción de “Batería” es la más relevante, con un peso local del 50.5%.

Fijándonos en el peso vemos que la implementación de un Monocasco es la alternativa preferible para minimizar este mismo criterio, cosa que es evidente ya que supondría una gran mejora pues como se ha comentado anteriormente un monocasco de fibra de carbono supondría una gran diferencia de peso frente al chasis tabular de acero de la temporada pasada, colocandose así con un peso del 46.1% en este criterio.

Conclusión

Finalmente se puede concluir de forma general que aplicando cualquiera de los distintos métodos disponibles de AHP la alternativa de **optimizar la batería**, esta opción lidera y debería implementarse como ya hemos comentado antes además de ser la opción más consistente en el resto de criterios. Por lo tanto, para las prioridades globales, las mejoras deberían enfocarse en Batería y Monocasco, seguidas por Telemetría.

ELECTRE

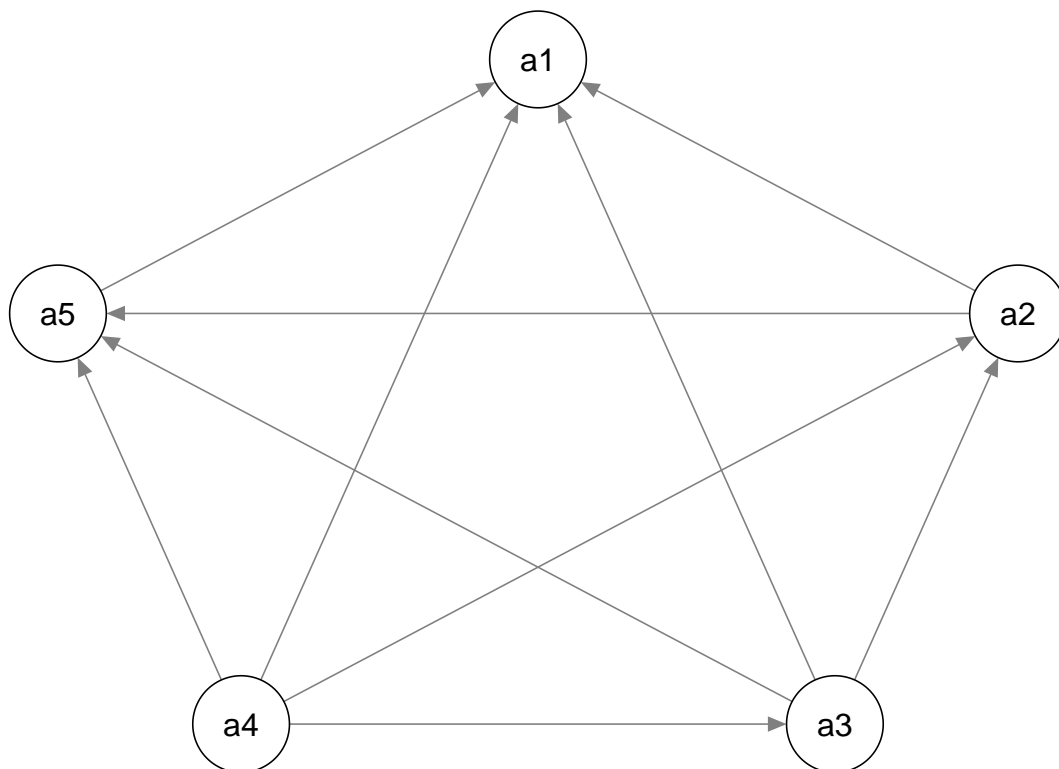
Dados la siguiente matriz de decisión con seis criterios con pesos: 43% , 26% , 14%, 8.3%, 4.8%, 3.18% respectivamente:

Cuadro 1: Datos

Criterio	Min/Max	Monocasco	4WD	Batería	Telemetría	Aerodinámica
Peso (kg)	Min	78	40	4	0	40
Coste (miles €)	Min	12	2	3,5	0,5	5
Fiabilidad	Max	1	4	3	5	2
Innovación	Max	5	3	3	4	2
Riesgos	Min	2	3	4	5	1
Sostenibilidad	Max	2	3	1	5	4

```
sal = multicriterio.metodoELECTRE_I(tab_ep,
                                   pesos.criterios = c(0.44,0.26,0.15,0.08
                                                         ,0.1,0.06),
                                   nivel.concordancia.minimo.alpha = 0.7,
                                   no.se.compensan = c(600, Inf, 4, Inf, Inf, Inf),
                                   que.alternativas = T)
```

```
qgraph::qgraph(sal$relacion.dominante)
```

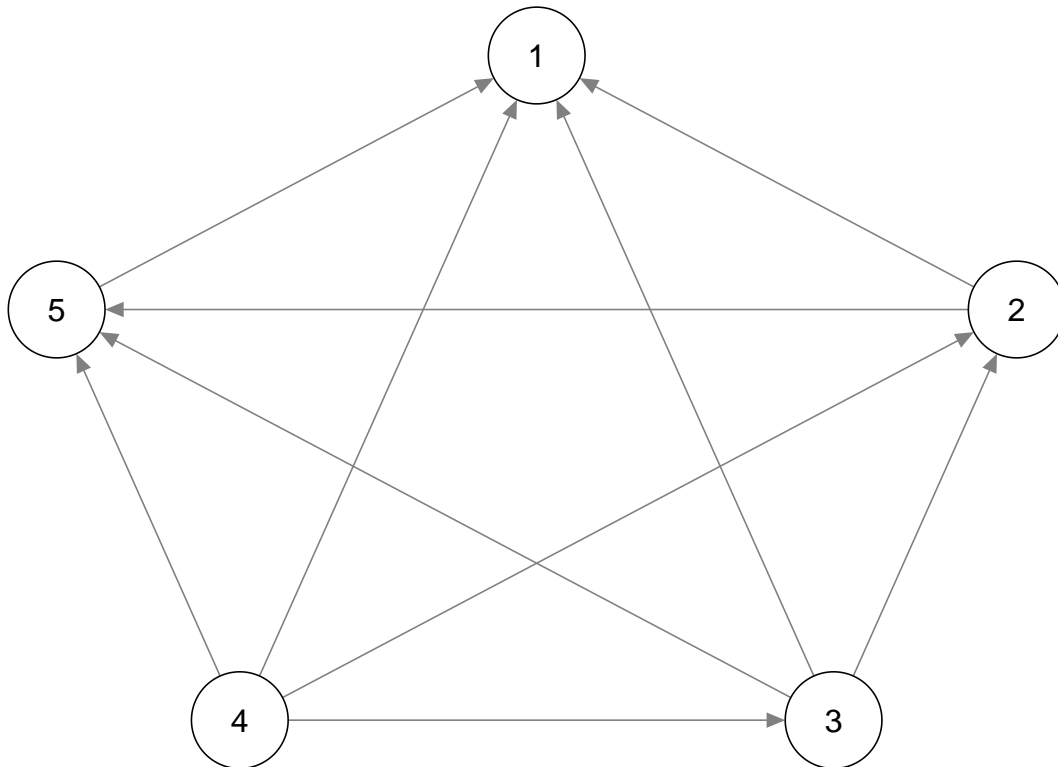


```
sal$nucleo_aprox
```

```
## a4
## 4
```

Según el método ELECTRE la mejora más óptima es a_4 implementar un sistema de telemetría. Además pueden ordenarse las alternativas:

```
electre = func_ELECTRE_Completo(sal)
grafo= electre$Grafo
qgraph::qgraph(electre$Grafo)
```



```
electre$Nucleo
```

```
## a4
## 4
```

- Alternativa 4 Telemetría (óptima): a_4Sa_1 , a_4Sa_2 , a_4Sa_3 y a_4Sa_5
- Alternativa 1 Monocasco : No supera a ninguna
- Alternativa 2 4WD: a_2Sa_5 , a_2Sa_1
- Alternativa 3: a_3Sa_1 , a_3Sa_2 y a_3Sa_5
- Alternativa 5: a_5Sa_1

PROMETHEE

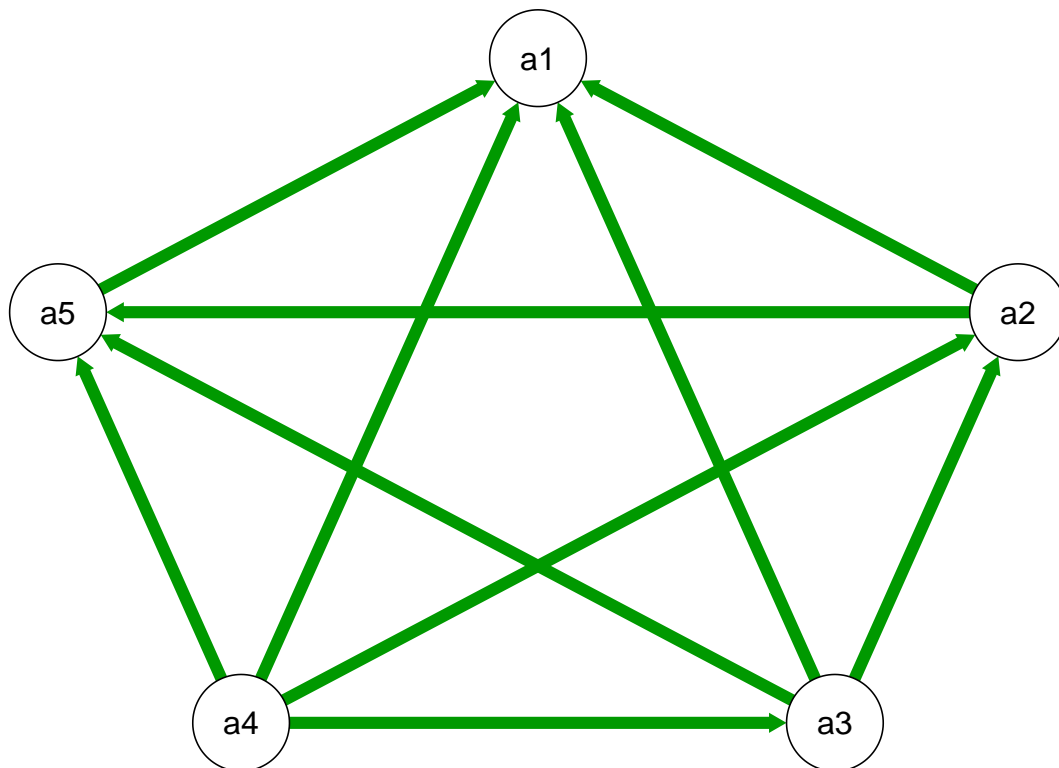
Tabla preferencias

Criterio	Min/Max	Monocasco	4WD	Batería	Telemetría	Aerodinámico	Tipo	Parámetros
Peso (kg)	Min	78	40	4	0	40	III	p=25
Coste (miles €)	Min	12	2	3,5	0,5	5	V	q=0,75 p=8
Fiabilidad	Max	1	4	3	5	2	II	q=15
Innovación	Max	5	3	3	4	2	VI	s=6
Riesgos	Min	2	3	4	5	1	IV	q=5, p=7
Sostenibilidad	Max	2	3	1	5	4	II	p=20

PROMETHEE I

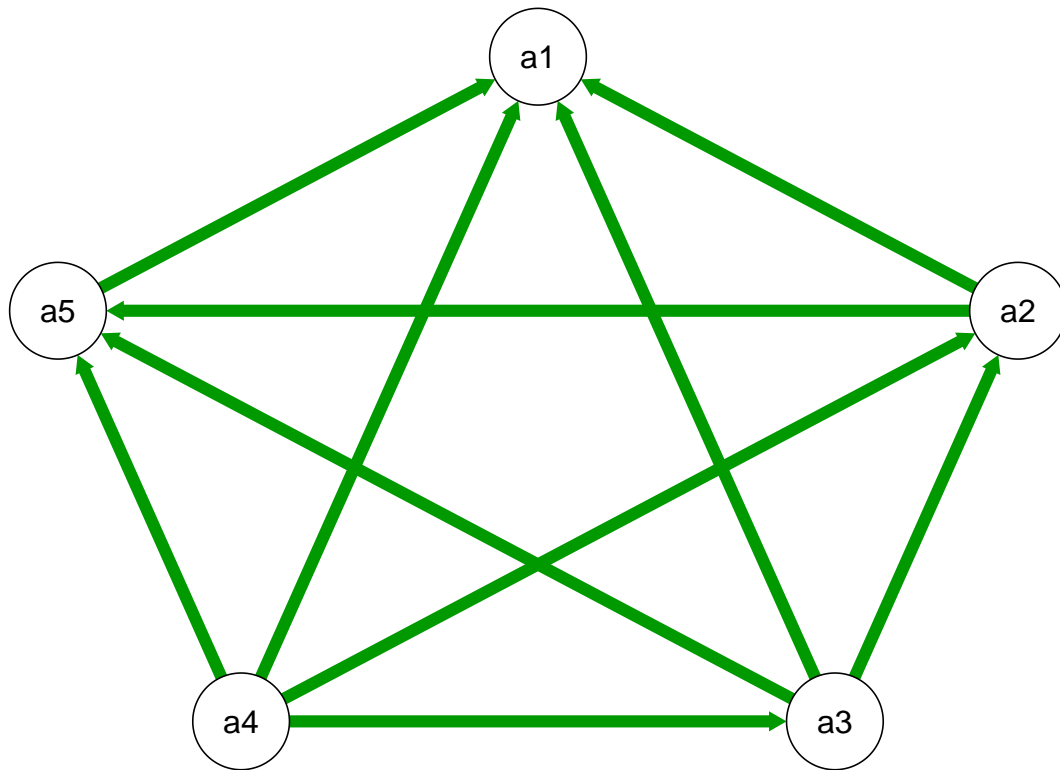
```
tab.Pthee.i = multicriterio.metodo.promethee_i(tab_ep,pesos.criterios,tab.fpref)
```

```
## Loading required package: qgraph
```



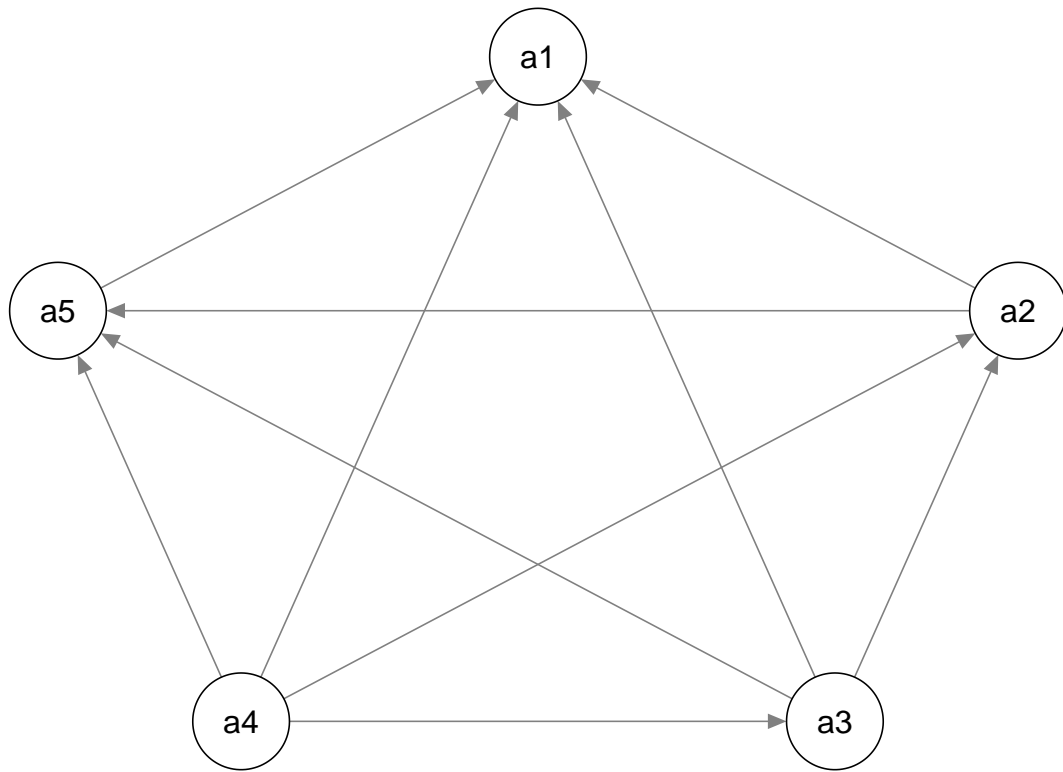
PROMETHEE II

```
tab.Pthee.ii = multicriterio.metodo.promethee_ii(tab_ep,pesos.criterios,tab.fpref)
```



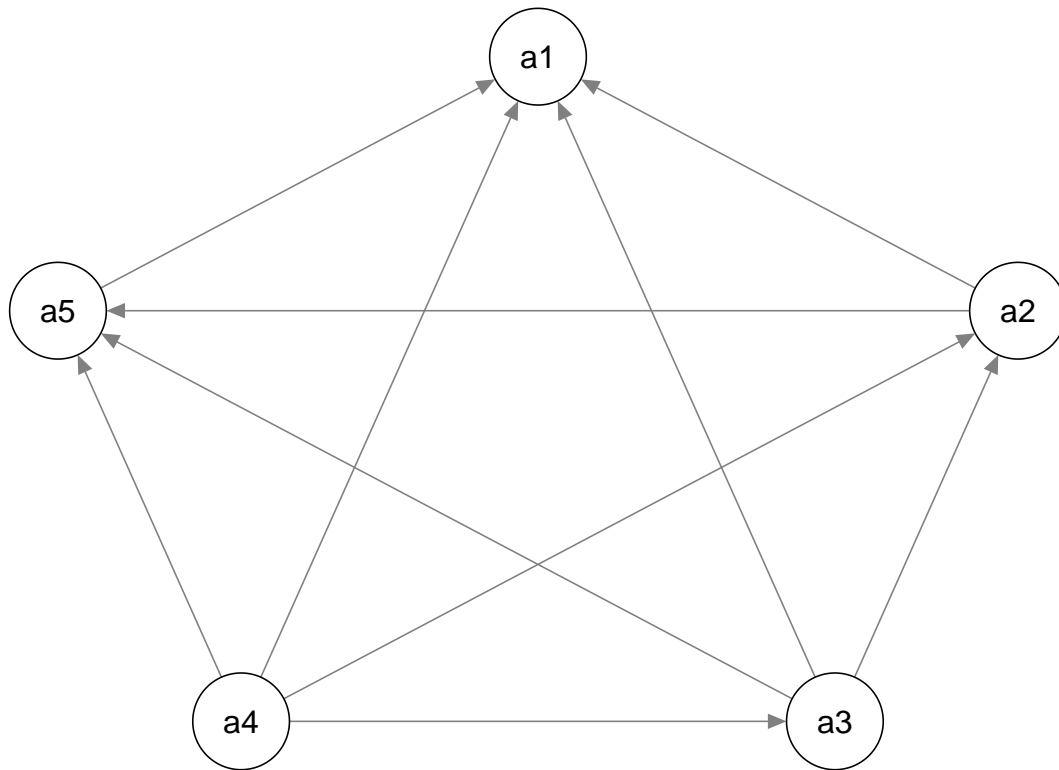
PROMETHEE I (medias)

```
tab.Pthee.i_med = multicriterio.metodo.promethee_i_med(tab_ep,pesos.criterios,tab.fpref)
```



PROMETHEE II (medias)

```
tab.Pthee.ii_med = multicriterio.metodo.promethee_ii_med(tab_ep,pesos.criterios,tab.fpref)
```

Comparativa Promethee II: sin medias y con medias

```
order(tab.Pthee.ii$vflujos.netos,decreasing = T)
```

```
## [1] 4 3 2 5 1
```

```
order(tab.Pthee.ii_med$vflujos.netos,decreasing = T)
```

```
## [1] 4 3 2 5 1
```

Como conclusión podemos ordenar las alternativas en el siguiente orden que nos muestra de más óptima a menos:

```
$Telemetría >> Batería >> 4WD >> Aerodinámica >> Monocasco$
```

Es la misma ordenación independientemente de si es con medias o sin ellas. Obteniendo de nuevo que la mejora más óptima es que se implemente una telemetría completa en el coche al igual que se concluía haciendo uso del método ELECTRE.

Resolución con Promethee Windows

```

res = multicriterio.metodo.promethee_windows(tab_ep, tab.fpref, pesos.criterios)
res = multicriterio.metodo.promethee_windows (tab_ep, tab.fpref, pesos.criterios,
fminmax = c("min","min","max","max","min","max"))

res02 = multicriterio.metodo.promethee_windows_kableExtra(res)

```

	Criterio1	Criterio2	Criterio3	Criterio4	Criterio5	Criterio6
Preferencias						
Min/Max	min	min	max	max	min	max
Pesos	0.44	0.26	0.15	0.08	0.1	0.06
Funciones Preferencias	V-shape (3)	Linear (5)	U-shape (2)	Gaussian (6)	Level (4)	U-shape (2)
Q: Indiferencia	0	0.75	5	0	5	2
P: Preferencia	5	8	0	0	4	0
S: Gausiano	0	0	0	6	0	0
Estadísticas						
Minimo	0	0.5	1	2	1	1
Maximo	78	12	5	5	5	5
Media	32.4	4.3	3.2	3.4	3	3
Desviacion Tipica	28.46	4.12	1.47	1.02	1.41	1.41
Evaluaciones						
a1	78	12	1	5	2	2
a2	40	2	4	3	3	3
a3	4	2	4	3	4	1
a4	0	0.5	5	4	5	5
a5	40	5	2	2	1	4

Tabla acciones

	Rango	Phi	Phi.mas	Phi.menos
a4	1	0.5614	0.5617	0.0003
a3	2	0.2894	0.4154	0.1261
a2	3	-0.0326	0.1954	0.2281
a5	4	-0.1169	0.1810	0.2979
a1	5	-0.7012	0.0048	0.7060

[1] "a4" "a3" "a2" "a5" "a1"

Con Promethee Windows obtenemos la siguiente ordenación:

Telemetría >> Batería >> 4WD >> Aerodinámica >> Monocasco

Conclusion

Podemos determinar que en rasgos generales las alternativas más óptimas para su implementación en el equipo son buscar una nueva configuración para optimizar el rendimiento de la **batería** y el desarrollo de un sistema de monitorización a tiempo real o **telemetría** como hemos estado llamándolo durante todo el proyecto. El hecho de que tanto PROMETHEE como ELECTRE coincidan en priorizar la Telemetría refuerza la robustez de esta conclusión, indicando que es una opción sólida independientemente de las variaciones en los parámetros de evaluación.