

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos a partir dos experimentos conduzidos para avaliar o desempenho do algoritmo de otimização proposto na metodologia. Os resultados são organizados em tabelas que ilustram o impacto do algoritmo na navegabilidade do ROV em diferentes cenários de falhas.

## 0.1 Combinações Mínimas de Thrusters

Na Tabela 1, são apresentadas as combinações mínimas de thrusters necessários para manter a navegabilidade do ROV em cada direção de movimento (*surge*, *sway*, *heave*, *yaw*), considerando os diferentes casos de falhas simuladas.

Tabela 1: Combinações mínimas de thrusters por direção (*surge*, *sway*, *heave*, *yaw*)

Direção	Combinação Mínima de Thrusters
<b>Surge</b>	Dois <i>thrusters</i> paralelos ou diagonais
<b>Sway</b>	Dois <i>thrusters</i> laterais ou diagonais
<b>Heave</b>	Dois <i>thrusters</i> verticais
<b>Yaw</b>	Dois <i>thrusters</i> diagonais

Fonte: Autores.

A partir da Tabela 1, é possível observar que alguns casos de falhas caem fora das combinações mínimas necessárias para manter a navegabilidade do ROV em determinadas direções. Isso indica que, em tais situações, o algoritmo de otimização não conseguiu redistribuir as forças de maneira eficaz para compensar a ausência dos thrusters falhos, resultando na incapacidade do ROV de se mover conforme desejado.

## 0.2 Resultados da Direção Surge

A Tabela 2 apresenta os erros médios obtidos após as repetições dos testes para a direção *Surge*. Os erros foram obtidos comparando a trajetória ideal sem o algoritmo de otimização com as trajetórias realizadas em cada caso de falha, tanto com o algoritmo de otimização (COM) quanto sem o algoritmo (SEM).

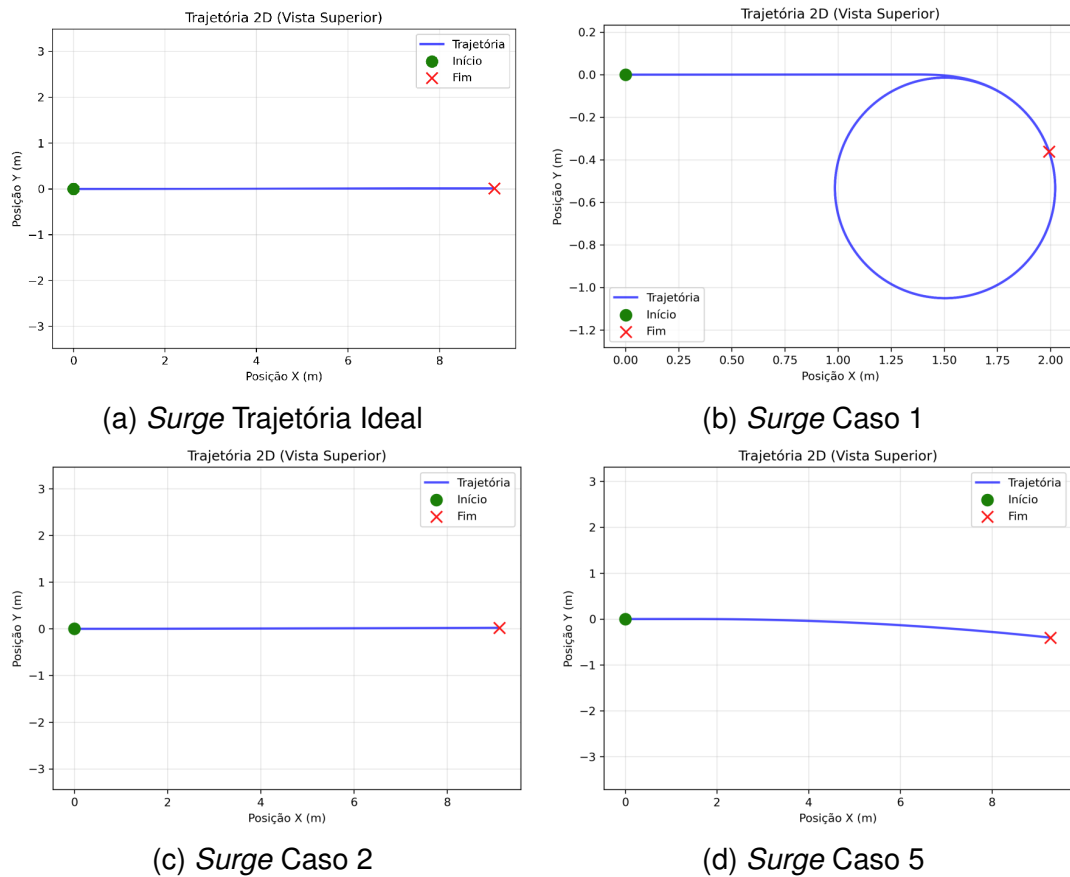
Tabela 2: Erro medio por Direção (*Surge*)

Caso		Vel (m/s)	Distância (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	yaw (°)
1	COM	0,005±0,031	0,448±0,101	-7,198±0,105	1,040±0	0,013±0,014	-360±0
	SEM	0,096±0,005	3,475±0,117	7,105±0,108	-1,116±0	0,014±0,008	-360±0
2	COM	-0,025±0,004	-0,024±0,115	-0,068±0,120	-0,01±0,001	0,041±0,003	-0,1±0
	SEM	0,091±0,008	3,630±0,247	3,592±0,247	0,00±0	0,038±0,004	0±0
3	COM	0,037±0,010	1,716±0,122	5,237±1,159	-3,770±0,027	-0,088±0,180	-11,4±0,089
	SEM	0,033±0,013	1,684±0,328	3,003±0,282	-3,820±0,152	0,006±0,023	-11,6±0,515
4	COM	-0,006±0,013	-0,171±0,132	-0,209±0,116	-0,49±0,088	-0,002±0,028	-6,9±0,612
	SEM	0,027±0,004	0,939±0,252	5,823±0,089	-3,39±0	0,012±0,005	-360±0
5	COM	-0,007±0,010	-0,008±0,181	-0,008±0,177	-0,38±0,012	0,012±0,022	-6,18±0,098
	SEM	0,025±0,007	1,129±0,013	5,862±0,017	-3,39±0	0,016±0,013	-360±0

Além disso, é possível observar que nos casos onde a combinação mínima de thrusters não é atendida, o algoritmo de otimização não consegue compensar adequadamente a falta dos propulsores, resultando em erros mais elevados. Isso evidencia a importância de uma configuração adequada dos thrusters para garantir a eficácia do algoritmo de otimização na manutenção da navegabilidade do ROV. Mesmo com o impacto na trajetória, o algoritmo de otimização ainda apresenta melhoras em relação a velocidade média do ROV e a distância percorrida, quando comparado ao caso sem otimização. É possível visualizar a disposição insatisfatória de *thrusters* no caso 1, onde apesar de apresentar uma melhora na velocidade média e na distância percorrida no caso com otimização em relação ao caso sem otimização, ainda apresenta um erro de  $360^\circ$  na orientação *yaw*, indicando a impossibilidade do ROV manter a trajetória desejada em *Surge*.

A figura 1 ilustra as trajetórias do ROV para a direção *Surge* nos casos 0 (ideal), 1, 2 e 5, com o algoritmo de otimização em ação. Observa-se que no caso 1, onde a combinação mínima de thrusters não é atendida, o ROV apresenta uma trajetória significativamente desviada da ideal, evidenciando a incapacidade do algoritmo de otimização em compensar a falha dos thrusters, devido à limitação de *hardware* do ROV. Em contraste, no caso 2, onde a combinação mínima é satisfeita, o ROV consegue seguir uma trajetória muito mais próxima da ideal, demonstrando a eficácia do algoritmo quando as condições mínimas são atendidas. O caso 5 também mostra uma melhora considerável em relação ao caso 1, embora ainda apresente desvios notáveis devido à falha do thruster.

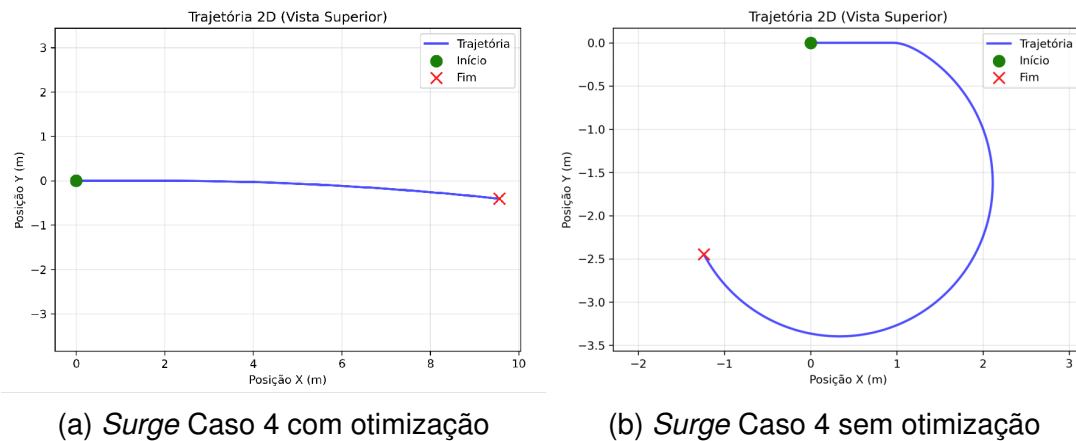
Figura 1: Trajetórias do ROV em *Surge* para os casos 0, 1, 2 e 5.



Fonte: Autores.

A figura 2 exemplifica a melhora realizada pela otimização quando a configuração mínima de *thrusters* é respeitada, sendo possível garantir que o ROV siga a trajetória desejada com desvios mínimos. Relacionando a trajetória apresentada na figura 2 com os dados do caso 4 na tabela 2, é possível observar que o erro medio em  $X$  é de apenas -0,209 m quando o algoritmo de otimização está ativo, enquanto sem o algoritmo, o erro médio aumenta significativamente para 5,823 m, que juntamente com o erro em  $yaw$  de apenas  $6,9^\circ$  com otimização e de  $360^\circ$  sem a otimização, indicam uma incapacidade do ROV de manter a trajetória desejada sem a otimização. Isso demonstra a eficácia do algoritmo de otimização em melhorar a navegabilidade do ROV em situações de falhas nos thrusters, desde que as combinações mínimas sejam atendidas.

Figura 2: Comparação da trajetória do ROV em *Surge* para o caso 4 com e sem otimização.



Fonte: Autores.

A tabela 3 apresenta os resultados dos erros medios medidos na direção *sway*. Na trajetória *sway*, o caso 1 atende às combinações minimas de *thrusters*, resultando em erros significativamente menores em comparação com os outros casos, em relação a trajetoria, mas ainda é possível observar a ação da otimização na velocidade e na distancia percorrida. O caso 2 não atende às combinações minimas de *thrusters* para a movimentação em *sway*, resultando em erros maiores na trajetória, mesmo com o algoritmo de otimização ativo. No entanto, o algoritmo ainda melhora a distancia percorrida e a velocidade media, ou seja mesmo com a falha, o ROV mantem a capacidade de se movimentar com uma velocidade proxima a ideal, percorrendo distancias parecidas, apresentando um erro medio de apenas -0,006 m/s em velocidade e 0,248 m em distancia percorrida, quando com o otimizador ativado, em contraste com erros medios de -0,052 m/s e 1,897 m respectivamente, quando o otimizador está desativado.

Tabela 3: Erro medio por Direção (*Sway*)

Caso		Vel (m/s)	Distância (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	yaw (°)
1	COM	0,006	-0,100	-0,051	-0,100	0,006	-0,44
	SEM	0,055	1,870	0,844	1,694	0,001	10,72
2	COM	-0,006	0,248	0,714	5,500	0,026	-333,8
	SEM	0,052	1,897	0,470	5,450	0,016	-333,8
3	COM	0,003	-0,156	-3,885	2,40	-0,015	11,2
	SEM	0,004	0,123	-3,368	2,46	-0,001	10,92
4	COM	-0,005	-0,007	-0,313	0,10	0,011	-6,26
	SEM	0,009	0,334	-1,013	4,28	0,003	-333,8
5	COM	-0,008	-0,206	-0,767	-0,07	0,004	-7,46
	SEM	0,010	0,484	-1,011	4,28	0,012	-333,8

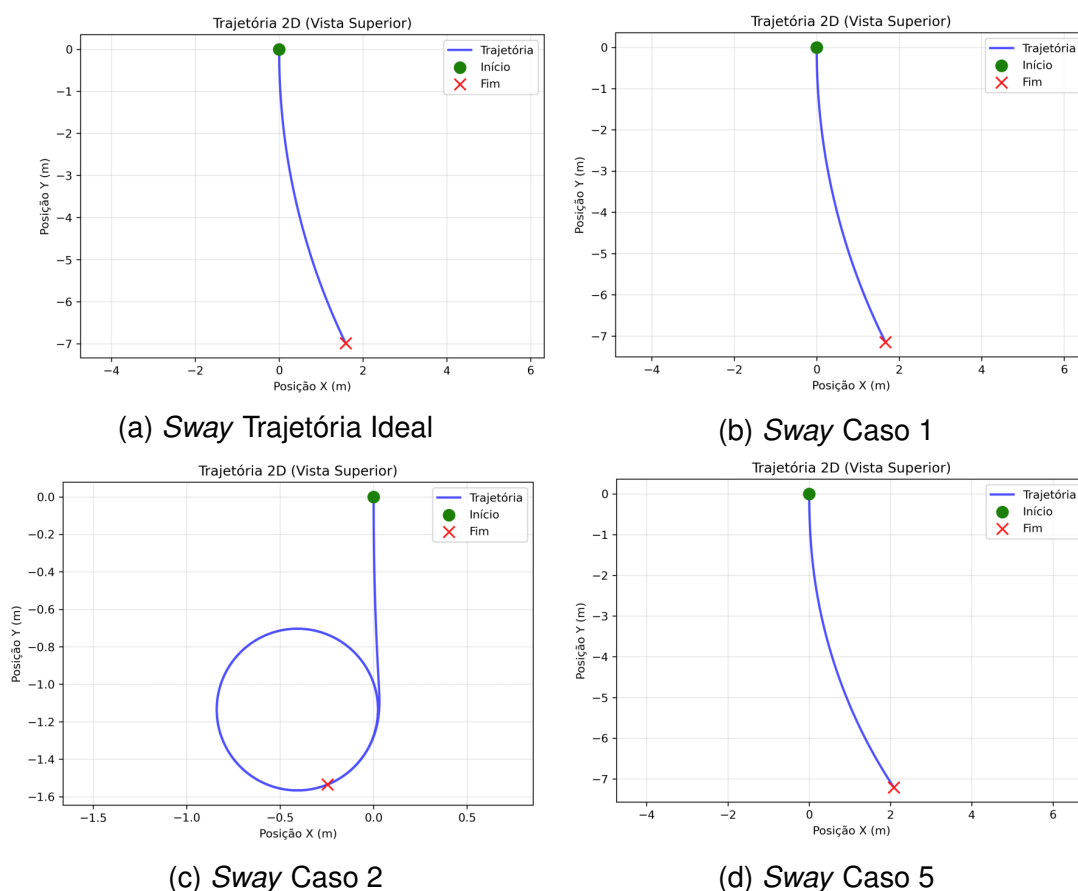
Fonte: Autores.

O otimizador demonstra sua eficiência principalmente no âmbito da velocidade média e distância percorrida, mesmo em casos onde a combinação mínima de *thrusters* não é atendida. Como o *BlueRov2 Standard*, possui uma configuração de 6 *thrusters*, o otimizador encontra limitações na redistribuição das forças quando múltiplos *thrusters* falham, o que causa uma dificuldade em manter a trajetória ideal, sendo possível visualizar erros significativos em *Yaw* nos casos que não atendem as combinações mínimas para aquela direção. Nos casos que atendem as combinações mínimas, o otimizador é capaz de diminuir o erro médio em *yaw*, que é causado pelas falhas dos *thrusters*, mantendo assim a capacidade do ROV de seguir a trajetória desejada.

O caso 3 se destaca por apresentar erros muito próximos entre os cenários com e sem otimização em qualquer trajetória, indicando que a falha diagonal representada pelo caso três tem a capacidade de se autocompensar devido ao posicionamento dos *thrusters* no ROV, o que minimiza o impacto da falha na capacidade de movimentação do veículo. Ainda que o impacto neste caso seja menos é possível obter melhorias significativas na velocidade média e distância percorrida com o otimizador ativado. O maior fator de melhoria observado para o algoritmo de otimização é observado tanto na distância percorrida quanto na velocidade média, mantendo a capacidade do ROV de manter a velocidade o mais próxima do ideal possível e preservando também a capacidade de percorrer distâncias similares ao caso ideal, mesmo com a falha de *thrusters*. Em relação a manutenção da trajetória ideal, o otimizador enfrenta dificuldades devido as limitações de *hardware* do ROV, essas limitações são refletidas nos casos que não respeitam as combinações mínimas de *thrusters*, e na trajetória *heave*. A combinação mínima exigida para que haja o funcionamento ideal da trajetória *heave* são de 2 *thrusters* como indicado na tabela 1, mas o ROV utilizado nos testes apresenta somente dois *thrusters* verticais em sua estrutura, impossibilitando que seja realizada a otimização no caso de falha de um dos *thrusters* verticais, o que impossibilita a movimentação ideal na direção *heave*. Em decorrência dessa limitação física do ROV, os resultados obtidos para a trajetória *heave* não são apresentados nesta seção.

Na figura 3 são ilustradas as trajetórias do ROV para a direção *Sway* nos casos 0 (ideal), 1, 2 e 5, com o algoritmo de otimização em ação. Assim como para a trajetória *Surge*, observa-se que no caso em que a falha não obedece a combinação mínima de *thrusters* (caso 2), o ROV apresenta uma trajetória significativamente desviada da ideal, evidenciando a incapacidade do algoritmo de otimização em compensar a falha dos *thrusters* devido a limitação de *hardware* do ROV. Em contraste, no caso 1, onde a combinação mínima é satisfeita, o ROV consegue seguir uma trajetória muito mais próxima da ideal, demonstrando a eficácia do algoritmo quando as condições mínimas são atendidas. O caso 5 também mostra uma melhora considerável em relação ao caso 2, embora ainda apresente desvios notáveis devido à falha do *thruster*.

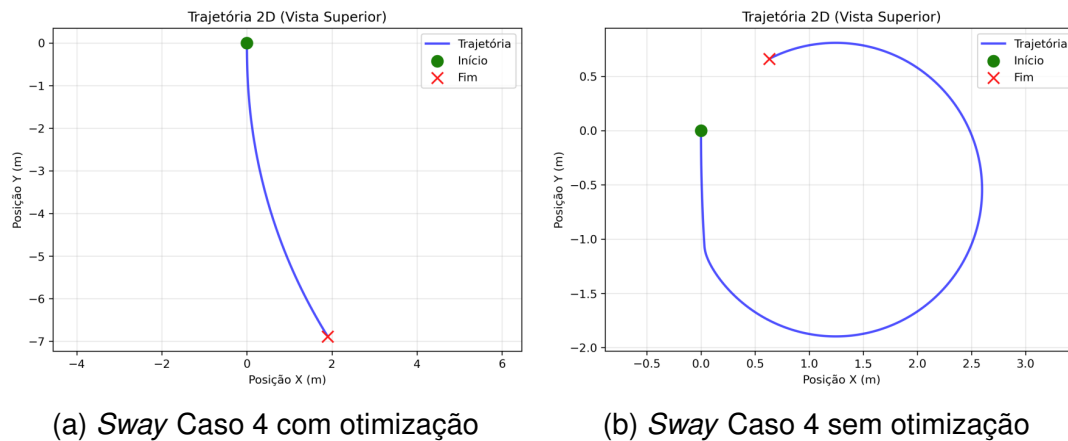
Figura 3: Trajetórias do ROV em *Sway* para os casos 0, 1, 2 e 5.



Fonte: Autores.

Na figura 4 é possível observar o efeito do algoritmo de otimização na trajetória do ROV para o caso 4, sendo possível visualizar a melhora significativa na trajetória do ROV quando o algoritmo de otimização está presente quando comparamos a trajetória feita com a trajetória ideal apresentada na figura 3, apresentando somente um pequeno desvio em relação a trajetória ideal, enquanto sem o algoritmo o ROV não seria capaz de manter a trajetória desejada, apresentando um desvio considerável em relação a trajetória ideal.

Figura 4: Comparação da trajetória do ROV em *Sway* para o caso 4 com e sem otimização.



Fonte: Autores.

Na tabela 4 são apresentados os resultados dos erros medios obtidos na direção *yaw*. Considerando a combinação ideal da trajetória *yaw* como sendo a combinação diagonal de *thrusters*, os resultados reforçam que a combinação do caso 3 obteve os melhores resultados nos testes. Contudo, o impacto do algoritmo de otimização na trajetória *yaw* é menos pronunciado em comparação com as outras direções, devido as características da movimentação rotacional do ROV juntamente com as limitações físicas do veículo em situação de falhas nos *thrusters*. Como metrica foi observada a capacidade do ROV completar o numero de voltas mais proximo do ideal, a capacidade de se manter na orientação correta sem se desviar nas outras direções e a velocidade media de rotação. Assim nesse contexto foi observado que os casos que apresentavam somente um *thruster* em falha (casos 4 e 5) apresentaram resultados mais satisfatórios, pois além de atenderem a combinação minima de *thrusters* para a movimentação em *yaw*, apresentam um *thruster* a mais em funcionamento, o que possibilita uma melhor redistribuição das forças, nesses casos apesar de apresentarem resultados melhores que os demais casos (1 e 2) a presença da otimização não foi capaz de melhorar os resultados quando comparados ao cenário sem otimização, indicando que a limitação física do ROV em termos de *thrusters* disponíveis impacta significativamente a eficácia do algoritmo de otimização na manutenção da navegabilidade em situações de falhas.

Tabela 4: Erro medio por Direção (Yaw)

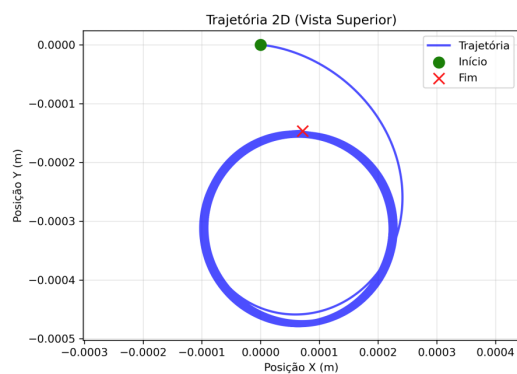
Caso		Vel (%s)	N° de Voltas	X (m)	Y (m)	Z (m)	yaw (°)
1	COM	92,360	8,020	-1,026	-1,101	0,006	2897,22
	SEM	48,020	4,180	-0,910	-186,728	0,002	1502,48
2	COM	99,78	9,020	-1,440	-1,31	0,008	3138,84
	SEM	49,120	4,3	-0,672	-0,67	0,001	1550,44
3	COM	44,880	3,900	-0,001	0,00	0,008	1399,74
	SEM	49,300	4,34	-0,001	0,00	0,012	1556,72
4	COM	41,060	2,720	-0,069	-0,06	-0,001	1235,02
	SEM	25,060	2,26	-0,376	-0,38	0,007	806,1
5	COM	41,360	3,520	-0,066	-0,07	0,002	1265,32
	SEM	25,580	2,14	-0,375	-0,38	-0,001	775,62

Fonte: Autores.

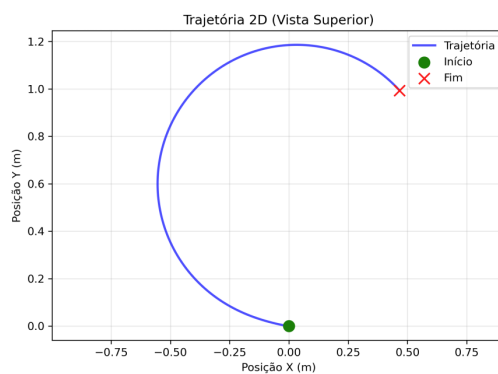
A figura 5 ilustra as trajetórias do ROV para a direção *Yaw* nos casos 0 (ideal), 1, 3 e 5, com o algoritmo de otimização em ação. Observa-se que, assim como mostrado na tabela 4, o otimizador não apresenta uma melhora significativa na trajetória do ROV em *Yaw*, sendo incapaz de manter a trajetória no caso 1, e apesar de conseguir completar a trajetória nos casos 3 e 5, ainda apresenta desvios consideráveis em relação à trajetória ideal, não sendo capaz de completar o mesmo numero de voltas, o que pode ser visto na densidade das linhas nas figuras. Relacionando ainda com a tabela 4, o algoritmo não foi capaz de melhorar a velocidade media de rotação mesmo nos casos que atendem as combinações mínimas de *thrusters* para a movimentação em *Yaw* (casos 3 e 5), sendo capaz de garantir que o roV complete a trajetorias, mas não no mesmo periodo de tempo e com uma velocidade cignificativamente reduzida.



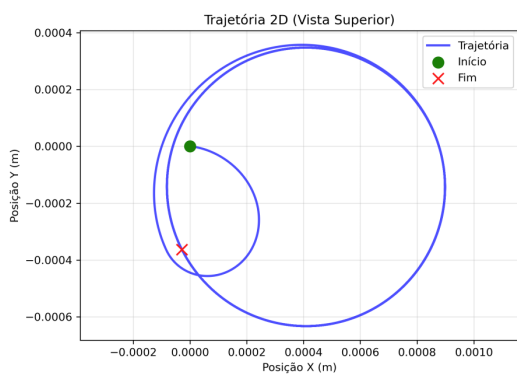
Figura 5: Trajetórias do ROV em Yaw para os casos 0, 1, 3 e 5.



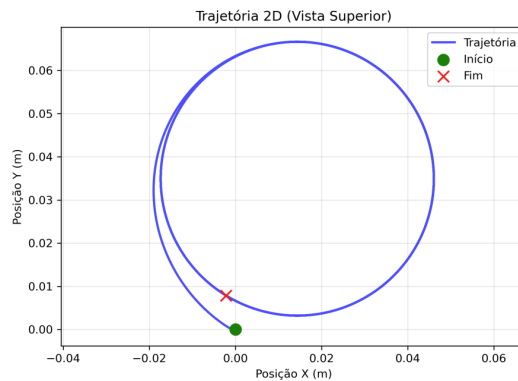
(a) Yaw Trajetória Ideal



(b) Yaw Caso 1



(c) Yaw Caso 3



(d) Yaw Caso 5

Fonte: Autores.