

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 <i>Thrusters</i>
Surge	Dois <i>thrusters</i> paralelos ou diagonais
Sway	Dois <i>thrusters</i> laterais ou diagonais
Heave	Dois <i>thrusters</i> verticais
Yaw	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 pode não redistribuir as forças de maneira eficaz para compensar a ausência dos *thrusters* falhos, resultando na incapacidade do ROV de se mover conforme desejado.

Destaca-se o Caso 3 como um cenário particular, onde o algoritmo de otimização apresenta impacto limitado em todas as direções de movimento (*surge*, *sway* e *yaw*), com desempenho equivalente ou apenas marginalmente superior ao caso sem otimização. Essa característica sugere que a configuração específica de falhas do Caso 3 permite ao ROV manter navegabilidade adequada independentemente da aplicação do algoritmo, vindo da redundância natural dos *thrusters* restantes.

0.2 Análise dos Resultados por Direção de Movimento

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).

Nos casos apresentados a seguir, é possível observar que os casos que apresentam o otimizador apresentaram erros menores em relação à velocidade e à distância final alcançada, mostrando a capacidade do algoritmo em manter a navegabilidade do ROV mesmo em situações de falha nos *thrusters*. O algoritmo demonstra especial eficácia na redução da variabilidade dos resultados, como evidenciado no Caso 2, onde o desvio padrão da velocidade foi reduzido de 0,008 sem otimização, para 0,004 com otimização (redução de 50%) e o desvio padrão da distância percorrida foi reduzido de 0,247 m para 0,115 m (redução de 53%) com o uso da otimização.

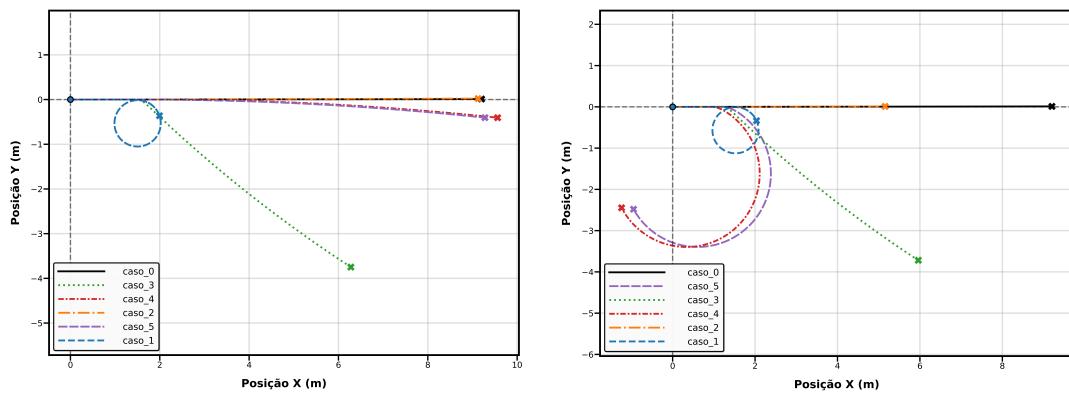
Tabela 2: Erro médio por Direção (*Surge*)

Caso	Vel (m/s)	Distância (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	yaw (°)
1	COM	0,005	0,448	-7,198	1,040	0,013
	SEM	0,096	3,475	7,105	-1,116	0,014
2	COM	-0,025	-0,024	-0,068	-0,01	0,041
	SEM	0,091	3,630	3,592	0,00	0,038
3	COM	0,037	1,716	5,237	-3,770	-0,088
	SEM	0,033	1,684	3,003	-3,820	0,006
4	COM	-0,006	-0,171	-0,209	-0,49	-0,002
	SEM	0,027	0,939	5,823	-3,39	0,012
5	COM	-0,007	-0,008	-0,008	-0,38	0,012
	SEM	0,025	1,129	5,862	-3,39	0,016

Fonte: Autores.

A figura 1 ilustra as trajetórias do ROV para a direção *Surge* para todos os 5 casos de falha e o caso ideal, tanto com o algoritmo de otimização em ação quanto sem o algoritmo. É possível visualizar que a trajetória do caso 1, em azul, se destaca entre as demais trajetórias do caso com otimização por não ter sido capaz de manter a trajetória em *surge*, isso ocorre devido ao tipo de falha do caso 1, pois a falha do caso 1 não obedece à combinação mínima de *thrusters* para a movimentação em *surge*, o ROV não é capaz de se movimentar adequadamente naquela direção, mesmo com o algoritmo de otimização ativo. Ainda na figura 1, é possível observar que as trajetórias dos casos sem otimização, em comparação com a trajetória ideal, em preto, apresentam maior dificuldade em se manter na trajetória, nos casos em que a trajetória se mantém, a distância percorrida no período de teste é significativamente menor do que a ideal, mostrando assim a eficiência do algoritmo de otimização em manter a navegabilidade do ROV.

Figura 1: Trajetórias do ROV em *Surge* com e sem otimização



(a) *Surge* Trajetória com otimização

(b) *Surge* Trajetória sem otimização

Fonte: Autores.

A tabela 3 apresenta os resultados dos erros médios medidos na direção *sway*. Na trajetória *sway*, observa-se o mesmo comportamento dos resultados anteriores, onde os casos que apresentam o otimizador apresentam erros menores, com um desvio de direção menor quando comparados aos mesmos casos sem o otimizador. Destaca-se particularmente o Caso 4, onde a aplicação do algoritmo de otimização resultou em uma redução significativa do desvio padrão da distância percorrida, de 0,324 sem otimização, para 0,050 com otimização (redução de 84,75%), demonstrando maior consistência e precisão no controle do movimento lateral.

Tabela 3: Erro médio 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

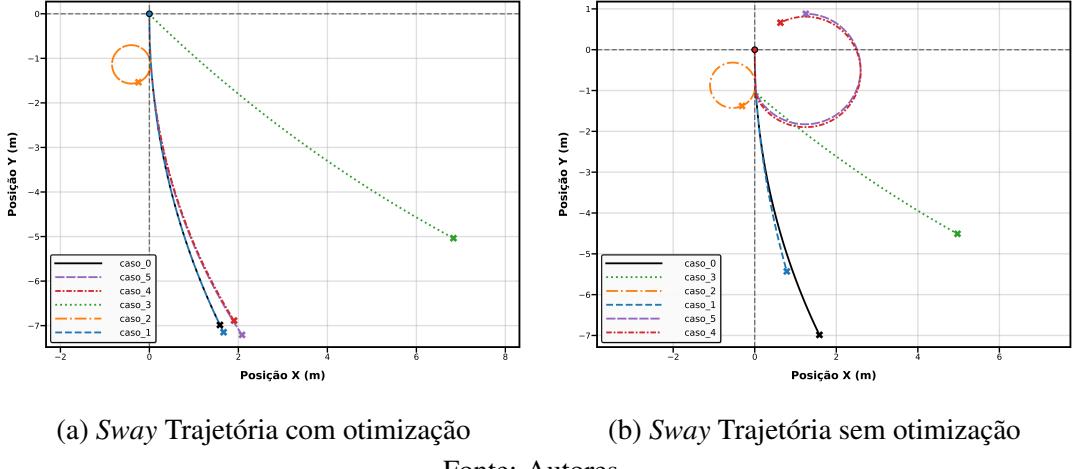
Fonte: Autores.

Na figura 2 ilustra as trajetórias do ROV para a direção *Sway* para todos os 5 casos de falha e o caso ideal, tanto com o algoritmo de otimização em ação quanto sem o algoritmo. É possível visualizar que a trajetória do caso 2, em laranja, tem o mesmo comportamento do caso 1 em *surge*, como não obedece a combinação mínima de *thrusters* para a movimentação em *sway*, o ROV não é capaz de se movimentar adequadamente naquela direção, mesmo com o algoritmo de otimização ativo.

Contudo, ao analisar a tabela 3, é possível visualizar que, mesmo com a incapacidade de se mover na direção correta, o erro entre a distância ideal e a distância percorrida no teste com o otimizador ativo é de apenas 0,248 m, indicando que o otimizador ainda atua na navegabilidade do ROV, possibilitando que o mesmo percorra uma distância próxima ao ideal no mesmo intervalo de tempo mesmo com falha. Porem, a limitação física da distribuição dos *thrusters* no modelo não permite que o ROV siga na direção correta, mesmo comportamento apresentado no caso 1 em *surge*.

Ainda na figura 2, é possível observar que as trajetórias dos casos sem otimização, apresentam comportamentos similares aos observados na direção *surge*, com desvios significativos em relação à trajetória ideal, evidenciando a dificuldade do ROV em manter o curso desejado sem o suporte do algoritmo de otimização.

Figura 2: Trajetórias do ROV em *Sway* com e sem otimização



Fonte: Autores.

Na tabela 4 são apresentados os resultados dos erros médios 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 às características da movimentação rotacional do ROV juntamente com as limitações físicas do veículo em situação de falhas nos *thrusters*. A complexidade inerente do movimento rotacional é evidenciada pelos elevados desvios padrão observados, como no Caso 1, onde o desvio da velocidade angular ($1,272^{\circ}/s$) e do ângulo *yaw* ($38,261^{\circ}$) são consideravelmente superiores aos desvios típicos dos movimentos lineares. Como métrica foi observada a capacidade do ROV completar o número de voltas mais próximo do ideal, a capacidade de se manter na orientação correta sem se desviar nas outras direções e a velocidade média 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 à combinação mínima 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 há uma limitação do algoritmo em melhorar a movimentação em *yaw* em situações de falhas nos *thrusters*. Apesar disso, o algoritmo de otimização ainda conseguiu manter a navegabilidade do ROV, seguindo assim a trajetória desejada, mas com eficiência reduzida.

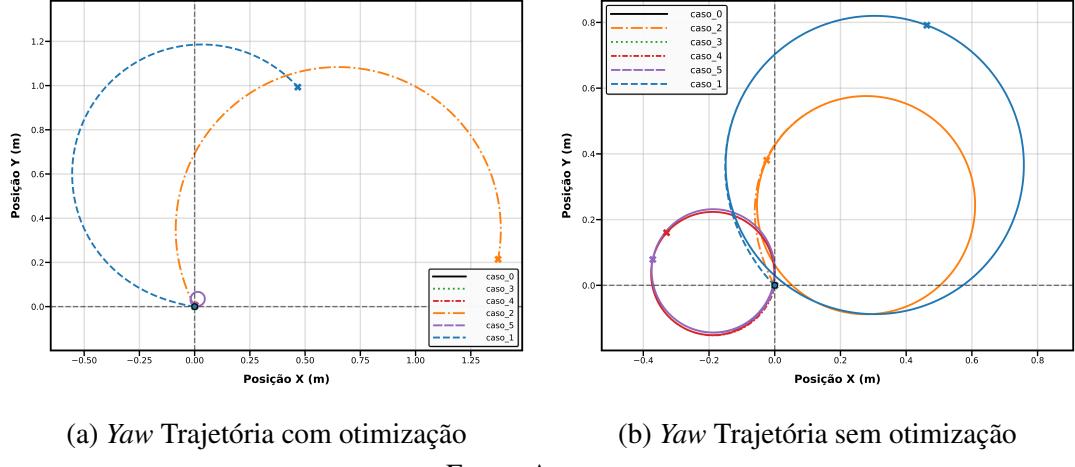
A figura 3 ilustra as trajetórias do ROV para a direção *Yaw* em todos dos casos de falha, incluindo o caso ideal sem falhas (caso 0). Observa-se que, assim como mostrado na tabela 4, o otimizador não apresenta uma melhora significativa na trajetória do ROV em *Yaw*, sendo incapaz de manter a trajetória 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 número de voltas, o que pode ser visto na tabela 4. Analisando ainda a tabela 4, o algoritmo não foi capaz de melhorar a velocidade média de rotação mesmo nos casos que atendem às combinações mínimas de *thrusters* para a movimentação em *Yaw* (casos 3 e 5), sendo capaz de garantir que o ROV complete as trajetórias, mas não no mesmo período de tempo e com uma velocidade significativamente reduzida.

Tabela 4: Erro médio por Direção (*Yaw*)

Caso		Vel (°/s)	Nº 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	-0,914	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.

Figura 3: Trajetórias do ROV em *Yaw* com e sem otimização



Fonte: Autores.

Os valores de desvio padrão em *yaw* demonstram comportamento significativamente mais complexo e instável em relação aos movimentos lineares, confirmando a natureza desafiadora do controle rotacional em situações de falha. Por exemplo, no Caso 2, o desvio padrão da velocidade angular atinge $7,190^{\circ}/s$ (COM) comparado a $1,602^{\circ}/s$ (SEM), enquanto o desvio do ângulo yaw alcança valores extremos de 222,878 (COM) versus 54,308 (SEM), ordens de magnitude superiores aos desvios observados nas direções surge e sway, que tipicamente ficam abaixo de 1,0. As variáveis lineares (X, Y e Z) mantêm dispersão mínima durante as rotações, sugerindo boa estabilidade posicional, mas a variabilidade angular evidencia os desafios inerentes ao controle de altitude em condições de falha dos *thrusters*.

Em relação à manutenção da trajetória ideal, o otimizador enfrenta dificuldades devido às limitações geradas pela disposição dos *thrusters* 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.