

## ANEXOS

### 1 Calibración del Algoritmo GRASP

En esta sección se presenta el procedimiento realizado para calibrar el algoritmo GRASP desarrollado para el presente proyecto de fin de carrera. Este procedimiento se basa en realizar un número determinado de pruebas con la finalidad de determinar cuáles son los valores del alfa ( $\alpha$ ) y el número de iteraciones (N) del algoritmo GRASP que permiten obtener la mejor solución posible.

También es necesario mencionar que este procedimiento se realizó usando una muestra de diez contenedores y cuarenta tuberías, la cual fue generada a partir de la herramienta generadora de datos.

#### 1.1 Calibración del Alfa

La calibración del Alfa se realizó de la siguiente manera:

En primer lugar, se realizaron 40 pruebas para cada valor del alfa propuesto. A continuación, se muestran los resultados de las pruebas realizadas para los valores del alfa entre 0.2 y 0.8. Esto se debe a que asignarle valores al alfa cercanos a uno modifica el comportamiento del algoritmo haciéndolo más aleatoria. Del mismo modo, asignarle valores cercanos a cero, modifica el comportamiento algoritmo haciéndolo voraz.

N° PRUEBA	ALFA 0.2	ALFA 0.3	ALFA 0.4	ALFA 0.5	ALFA 0.6	ALFA 0.7	ALFA 0.8
1	0.036729	0.040255	0.039507	0.040055	0.039609	0.038459	0.036492
2	0.037915	0.040162	0.039949	0.040490	0.037583	0.038051	0.037796
3	0.038310	0.039108	0.039984	0.038430	0.039906	0.039173	0.037799
4	0.039829	0.039990	0.039791	0.039774	0.037768	0.036906	0.037880
5	0.036641	0.040752	0.040131	0.039410	0.038382	0.039145	0.038034
6	0.037219	0.039505	0.040789	0.039413	0.039534	0.037646	0.037813
7	0.037681	0.041299	0.042713	0.039420	0.037763	0.038043	0.039010
8	0.038407	0.040398	0.039463	0.039193	0.037257	0.037745	0.037145
9	0.038174	0.039599	0.040122	0.039949	0.041725	0.037770	0.037195
10	0.038398	0.040133	0.040033	0.039707	0.038886	0.036730	0.036964
11	0.038697	0.039225	0.039339	0.039445	0.038393	0.037749	0.039494
12	0.038397	0.040625	0.038808	0.039534	0.038450	0.037168	0.037130
13	0.036977	0.039347	0.039963	0.039053	0.039308	0.037916	0.037014
14	0.036881	0.039963	0.039151	0.038728	0.038934	0.038240	0.037509
15	0.036936	0.039752	0.038930	0.040460	0.038490	0.038112	0.036673
16	0.039675	0.040153	0.040151	0.038684	0.037305	0.037811	0.037236
17	0.038866	0.039916	0.040243	0.039359	0.037787	0.038534	0.039642
18	0.037067	0.039917	0.039671	0.040913	0.038498	0.037310	0.037979
19	0.038979	0.040121	0.038506	0.039579	0.038764	0.039463	0.036791
20	0.036916	0.040248	0.040906	0.038459	0.039841	0.037598	0.037171

N° PRUEBA	ALFA 0.2	ALFA 0.3	ALFA 0.4	ALFA 0.5	ALFA 0.6	ALFA 0.7	ALFA 0.8
21	0.037353	0.039908	0.038947	0.039109	0.040064	0.037657	0.037000
22	0.037472	0.039111	0.039817	0.039824	0.038757	0.037782	0.037258
23	0.038235	0.039872	0.039596	0.040320	0.038546	0.038744	0.038104
24	0.036743	0.039844	0.039993	0.038970	0.038587	0.037782	0.037789
25	0.037010	0.041491	0.039925	0.039243	0.038325	0.038824	0.037804
26	0.036892	0.040692	0.039608	0.038662	0.038442	0.037577	0.037789
27	0.038108	0.039325	0.038863	0.037467	0.037820	0.039242	0.038783
28	0.037664	0.039215	0.039210	0.041456	0.038286	0.038495	0.037386
29	0.037590	0.039210	0.038615	0.038768	0.038165	0.038111	0.037251
30	0.037024	0.038562	0.039219	0.040349	0.040300	0.037470	0.036904
31	0.037269	0.039998	0.039363	0.038345	0.038131	0.038530	0.036989
32	0.037887	0.039700	0.040386	0.038261	0.037866	0.038667	0.039647
33	0.037247	0.038328	0.039593	0.038439	0.039018	0.037050	0.038463
34	0.037728	0.039367	0.039842	0.040204	0.038792	0.037934	0.038093
35	0.038679	0.039719	0.038898	0.041064	0.038474	0.040830	0.037210
36	0.040190	0.039685	0.039055	0.039867	0.038922	0.037887	0.037970
37	0.038161	0.039913	0.038500	0.040784	0.038445	0.037394	0.036952
38	0.037632	0.039762	0.039511	0.039023	0.040128	0.037736	0.036395
39	0.037094	0.039234	0.038871	0.041420	0.040307	0.037953	0.036959
40	0.037620	0.038733	0.038837	0.038262	0.037828	0.039052	0.040122

Además, para poder evaluar la calidad de cada alfa propuesto, se analizó el promedio, el mínimo valor, el máximo valor y la desviación estándar de cada grupo de pruebas. De este modo, se podrá determinar qué valor es el más apropiado para asignarle al alfa.

MEDIDA ESTADÍSTICA	ALFA 0.2	ALFA 0.3	ALFA 0.4	ALFA 0.5	ALFA 0.6	ALFA 0.7	ALFA 0.8
PROMEDIO	0.037807	<b>0.039803</b>	0.039620	0.039497	0.038735	0.038107	0.037691
MINIMO	0.036641	<b>0.038328</b>	0.038500	0.037467	0.037257	0.036730	0.036395
MAXIMO	0.040190	<b>0.041491</b>	0.042713	0.041456	0.041725	0.040830	0.040122
DESVIACION ESTANDAR	0.000884	<b>0.000656</b>	0.000779	0.000930	0.000942	0.000790	0.000902

Como se puede apreciar, cuando el valor del alfa es 0.3 se obtiene el mejor promedio. Además, en base a su mínimo y máximo se puede determinar que el valor de la función objetivo cuando se usa este alfa es el que menos posibilidades tiene de cambiar considerablemente, lo cual también se ve reflejado en su desviación estándar.

Una vez determinado el valor del alfa más óptimo en el primer conjunto de alfas propuestos, se debe realizar una segunda prueba con valores de alfa cercanos al más óptimo encontrado hasta el momento. En base a esto, se realizó una segunda prueba con valores del alfa entre 0.22 y 0.38.

N° PRUEBA	ALFA 0.22	ALFA 0.24	ALFA 0.26	ALFA 0.28	ALFA 0.3	ALFA 0.32	ALFA 0.34	ALFA 0.36	ALFA 0.38
1	0.038929	0.039922	0.039545	0.040984	0.039312	0.040285	0.039352	0.039149	0.039256
2	0.038652	0.039455	0.040156	0.039742	0.039762	0.039241	0.039651	0.039890	0.039401
3	0.038940	0.039594	0.039640	0.041184	0.040007	0.038848	0.039326	0.040232	0.038947
4	0.039532	0.039723	0.039830	0.040073	0.039563	0.039013	0.039556	0.040156	0.042241
5	0.039779	0.039034	0.040561	0.040209	0.040953	0.039351	0.039183	0.039971	0.038738
6	0.039255	0.039633	0.039698	0.039549	0.039828	0.039300	0.038586	0.039212	0.038731
7	0.039546	0.040415	0.039705	0.038916	0.040422	0.039287	0.039783	0.038620	0.039610
8	0.038832	0.039405	0.039688	0.039632	0.040115	0.039259	0.038938	0.039533	0.039565
9	0.039493	0.040284	0.040319	0.038952	0.039186	0.039758	0.039261	0.039637	0.040857
10	0.039658	0.039783	0.039522	0.038892	0.040304	0.039942	0.041751	0.039517	0.040129
11	0.038816	0.039437	0.039762	0.041660	0.039117	0.040518	0.039473	0.039587	0.039361
12	0.039523	0.039839	0.041137	0.039556	0.039378	0.040352	0.039785	0.039903	0.038546
13	0.039310	0.040025	0.040167	0.038960	0.039278	0.039450	0.039662	0.044232	0.039345
14	0.038280	0.040028	0.041477	0.038981	0.039500	0.039953	0.040673	0.040234	0.041950
15	0.038697	0.039779	0.039526	0.039783	0.039943	0.038331	0.039532	0.040421	0.039178
16	0.039264	0.039149	0.041004	0.038854	0.039259	0.040138	0.039553	0.039408	0.040058
17	0.039622	0.039037	0.039827	0.039790	0.039304	0.039688	0.040942	0.039526	0.039252
18	0.040117	0.039795	0.039506	0.040412	0.039762	0.039977	0.042459	0.038661	0.040047
19	0.039213	0.039246	0.042069	0.038799	0.039454	0.039667	0.039999	0.039700	0.039744
20	0.039635	0.039400	0.039895	0.039713	0.040601	0.039153	0.039879	0.040650	0.042036
21	0.038542	0.039932	0.039906	0.040978	0.039598	0.039670	0.039420	0.040429	0.041247
22	0.039572	0.040615	0.041220	0.039502	0.039714	0.039325	0.039348	0.039226	0.039389
23	0.040048	0.039660	0.040923	0.039417	0.039143	0.040284	0.039655	0.040176	0.039170
24	0.039485	0.039867	0.039366	0.038690	0.040093	0.039324	0.039750	0.039378	0.040138

25	0.039320	0.040028	0.040715	0.039928	0.038991	0.038858	0.038599	0.040185	0.039446
26	0.039536	0.039518	0.042253	0.039244	0.040266	0.039653	0.039076	0.040626	0.039293
27	0.039178	0.039881	0.039900	0.039463	0.039082	0.039493	0.039721	0.039097	0.039484
28	0.038829	0.039936	0.039453	0.039940	0.040483	0.039828	0.039835	0.039673	0.039841
29	0.038915	0.039845	0.040137	0.039731	0.038640	0.040036	0.040571	0.039851	0.040740
30	0.038834	0.042009	0.041637	0.039877	0.040562	0.038674	0.041391	0.039331	0.039447
31	0.039065	0.040591	0.039610	0.038890	0.039020	0.039376	0.039040	0.040249	0.039319
32	0.038734	0.039517	0.041847	0.040435	0.038659	0.039549	0.041026	0.039220	0.040538
33	0.040185	0.039240	0.040173	0.039785	0.038971	0.038805	0.039652	0.039528	0.039447
34	0.038898	0.041341	0.040322	0.039661	0.039787	0.038903	0.039232	0.040392	0.039993
35	0.039643	0.040616	0.039976	0.039516	0.039207	0.039256	0.040780	0.040210	0.039064
36	0.042203	0.040363	0.039126	0.038450	0.039535	0.040445	0.039295	0.039400	0.039752
37	0.041047	0.039366	0.039368	0.038681	0.039310	0.040965	0.039179	0.038419	0.039220
38	0.038883	0.038815	0.039574	0.039576	0.038841	0.040103	0.040251	0.038878	0.039433
39	0.039412	0.040873	0.041233	0.039925	0.039687	0.039273	0.039009	0.040908	0.040157
40	0.039612	0.040034	0.038592	0.039037	0.040674	0.038837	0.039502	0.039810	0.040211

Del mismo modo, se generó una tabla con las medidas estadísticas que permiten evaluar este segundo grupo de alfas propuestos.

MEDIDAS ESTADÍSTICAS	ALFA 0.22	ALFA 0.24	ALFA 0.26	ALFA 0.28	ALFA 0.3	ALFA 0.32	ALFA 0.34	ALFA 0.36	ALFA 0.38
PROMEDIO	0.039376	<b>0.039876</b>	<b>0.040209</b>	0.039634	0.039633	0.039554	0.039792	0.039831	0.039808
MINIMO	0.038280	<b>0.038815</b>	<b>0.038592</b>	0.038450	0.038640	0.038331	0.038586	0.038419	0.038546
MAXIMO	0.042203	<b>0.042009</b>	<b>0.042253</b>	0.041660	0.040953	0.040965	0.042459	0.044232	0.042241
DESVIACION ESTANDAR	0.000696	<b>0.000631</b>	<b>0.000859</b>	0.000724	0.000584	0.000574	0.000833	0.000921	0.000872

En esta ocasión, se puede observar que se obtiene los mejores promedios de la función objetivo cuando los valores del alfa son 0.24 o 0.26. En base a esto, se realizó una prueba más en la cual se tomaron solo los valores de alfa entre 0.24 y 0.26.

N° PRUEBA	ALFA 0.24	ALFA 0.25	ALFA 0.26
1	0.039144	0.041883	0.039579
2	0.040118	0.039310	0.039468
3	0.040053	0.039054	0.039488
4	0.039613	0.039608	0.040340
5	0.040202	0.040291	0.039647
6	0.039782	0.039683	0.039634
7	0.039221	0.040777	0.039298
8	0.039545	0.040134	0.040276
9	0.039129	0.039743	0.040060
10	0.039469	0.039998	0.039865
11	0.039860	0.040455	0.039825
12	0.040097	0.040156	0.039240
13	0.039511	0.040699	0.040204
14	0.038883	0.039616	0.040226
15	0.039119	0.040852	0.038716
16	0.040236	0.038927	0.039802
17	0.039617	0.038954	0.039688
18	0.040063	0.040924	0.039865
19	0.040035	0.039480	0.040713
20	0.039765	0.039531	0.040357
21	0.038965	0.040345	0.039940
22	0.041639	0.039925	0.039553
23	0.040294	0.041731	0.040505
24	0.039182	0.039870	0.039650
25	0.039610	0.040509	0.039914



N° PRUEBA	ALFA 0.24	ALFA 0.25	ALFA 0.26
26	0.038806	0.039613	0.039899
27	0.039864	0.039480	0.039417
28	0.039058	0.039981	0.040078
29	0.040113	0.040091	0.040421
30	0.040065	0.039535	0.039669
31	0.040012	0.040615	0.038858
32	0.039555	0.040357	0.040043
33	0.039366	0.039460	0.040617
34	0.039247	0.040516	0.040685
35	0.039004	0.039677	0.039931
36	0.040077	0.039536	0.039581
37	0.039802	0.039432	0.040880
38	0.039400	0.039940	0.039943
39	0.040383	0.041351	0.040338
40	0.039443	0.040188	0.041753

Del mismo modo, que para las pruebas anteriores, se genera una tabla con las medidas estadísticas para los valores de alfa entre 0.24 y 0.26.

MEDIDAS ESTADÍSTICAS	ALFA 0.24	ALFA 0.25	ALFA 0.26
PROMEDIO	0.039684	<b>0.040056</b>	0.039949
MINIMO	0.038806	<b>0.038927</b>	0.038716
MAXIMO	0.041639	<b>0.041883</b>	0.041753
DESVIACION ESTANDAR	0.000541	<b>0.000691</b>	0.000561

Finalmente, se escoge el valor de 0.25 como el valor calibrado para la variable alfa ya que es el que mejor promedio de todas las muestras obtenidas durante la calibración.

## 1.2 Calibración del Número de Iteraciones

La calibración del número de iteraciones se realizó de la siguiente manera:

En primer lugar, se realizaron 40 pruebas para cada valor del número de iteraciones propuesto. A continuación, se muestran los resultados de las pruebas realizadas para los valores: 2000, 4000, 8000, 16000 y 32000. Esto se debe a que se establece como límite superior para el algoritmo las 32000 iteraciones y en base a valores menores se busca establecer en que momento la solución generada por el algoritmo GRASP ya no mejora significativamente.

N° PRUEBA	N =				
	N = 2000	N = 4000	N = 8000	16000	N = 32000
1	0.036454	0.037572	0.040392	0.038911	0.040818
2	0.037840	0.039243	0.038827	0.039880	0.039743
3	0.037895	0.038362	0.039086	0.039782	0.039340
4	0.038349	0.038961	0.037701	0.038498	0.038951
5	0.038825	0.037825	0.039627	0.040251	0.040751
6	0.037476	0.039571	0.038055	0.039969	0.039548
7	0.037784	0.037364	0.040040	0.039384	0.039555
8	0.039943	0.038109	0.038013	0.039624	0.041730
9	0.037136	0.039137	0.039157	0.038885	0.039570
10	0.039188	0.040118	0.038135	0.039565	0.040619
11	0.039061	0.038570	0.037639	0.039133	0.039713
12	0.038810	0.037628	0.038552	0.040550	0.039723
13	0.038129	0.037344	0.039515	0.040649	0.041426
14	0.037120	0.038321	0.038407	0.040124	0.039763
15	0.037674	0.039048	0.038937	0.039353	0.040381
16	0.037903	0.038908	0.039111	0.039996	0.040533
17	0.038331	0.039090	0.039621	0.039362	0.039778
18	0.041317	0.039719	0.040880	0.040021	0.040120
19	0.039423	0.039046	0.040004	0.039959	0.040039
20	0.037725	0.039707	0.038843	0.039556	0.040263
21	0.039094	0.038777	0.039410	0.039791	0.041045
22	0.038191	0.037951	0.040446	0.039717	0.040331
23	0.037277	0.039010	0.039811	0.040416	0.041461
24	0.038149	0.040155	0.040380	0.040139	0.039787



25	0.037711	0.038390	0.038288	0.040306	0.040118
26	0.038106	0.037499	0.039078	0.038977	0.040657
27	0.038079	0.039817	0.039084	0.039534	0.041483
28	0.037208	0.039095	0.039784	0.041252	0.041294
29	0.036926	0.038739	0.039310	0.039351	0.040570
30	0.036567	0.038794	0.039360	0.039965	0.039229

N°	N =				
	PRUEBA	N = 2000	N = 4000	N = 8000	16000
31	0.038995	0.039686	0.039739	0.040059	0.041033
32	0.036727	0.038847	0.039782	0.038909	0.040531
33	0.038292	0.037976	0.039376	0.039456	0.040695
34	0.038235	0.037092	0.039124	0.039820	0.039523
35	0.038197	0.038180	0.038465	0.039749	0.039109
36	0.036552	0.039194	0.038407	0.039393	0.040816
37	0.038204	0.038025	0.038902	0.041247	0.039042
38	0.036984	0.040476	0.039098	0.038941	0.040649
39	0.038029	0.038836	0.039910	0.039157	0.038813
40	0.039644	0.039765	0.039139	0.039015	0.039896

Además, para poder evaluar la calidad de cada número de iteraciones propuesto, se analizó el promedio, el mínimo valor, el máximo valor y la desviación estándar de cada grupo de pruebas. De este modo, se podrá determinar qué valor es el más apropiado para asignarle al número de iteraciones.

MEDIDA					
ESTADÍSTICA	N = 2000	N = 4000	N = 8000	N = 16000	N = 32000
<b>PROMEDIO</b>	0.038089	0.038749	0.039186	<b>0.039716</b>	<b>0.040211</b>
<b>MINIMO</b>	0.036454	0.037092	0.037639	<b>0.038498</b>	<b>0.038813</b>
<b>MAXIMO</b>	0.041317	0.040476	0.040880	<b>0.041252</b>	<b>0.041730</b>
<b>DESVIACION ESTANDAR</b>	0.001006	0.000851	0.000769	<b>0.000616</b>	<b>0.000763</b>

Una vez determinado los valores de las medias más óptimas para el primer grupo de muestras propuestas, se debe realizar una segunda prueba con valores del número de iteraciones entre los valores más óptimos encontrados hasta el momento. En base a

esto, se realizó una segunda prueba con los siguientes valores para el número de iteraciones.

N°					
PRUEBA	N = 16000	N = 20000	N = 24000	N = 28000	N = 32000
1	0.039912	0.039891	0.039483	0.039267	0.040179
2	0.039583	0.039563	0.040031	0.039595	0.039368
3	0.039624	0.040718	0.039792	0.040309	0.039556
4	0.038963	0.039713	0.038679	0.039298	0.039818
5	0.038996	0.040007	0.040455	0.039515	0.040246
6	0.039045	0.039942	0.039793	0.040046	0.040955
7	0.039275	0.040340	0.039596	0.040418	0.039803
8	0.039843	0.039803	0.040813	0.040840	0.041567
9	0.038444	0.039469	0.039907	0.039709	0.041062
10	0.038866	0.041034	0.039806	0.039878	0.039614

N°					
PRUEBA	N = 16000	N = 20000	N = 24000	N = 28000	N = 32000
11	0.040075	0.039435	0.039333	0.040171	0.040016
12	0.040894	0.040086	0.039359	0.039806	0.041064
13	0.039710	0.040053	0.039552	0.039621	0.039776
14	0.039305	0.039373	0.039682	0.040303	0.039281
15	0.039377	0.039147	0.039833	0.040275	0.039859
16	0.040038	0.039526	0.039740	0.040471	0.039768
17	0.039599	0.040033	0.040270	0.040001	0.041680
18	0.039496	0.039690	0.039633	0.038991	0.040386
19	0.038648	0.040160	0.040115	0.040037	0.040335
20	0.040053	0.040606	0.042169	0.040482	0.040113
21	0.040207	0.039462	0.039391	0.039773	0.039758
22	0.039896	0.039439	0.039500	0.040857	0.040178
23	0.039571	0.039412	0.039622	0.040054	0.040791
24	0.038496	0.039550	0.039160	0.040424	0.040117
25	0.039583	0.039885	0.039450	0.039286	0.039264
26	0.039607	0.039554	0.040050	0.040328	0.041517
27	0.040674	0.039859	0.039679	0.039097	0.040075
28	0.039466	0.040118	0.040200	0.039462	0.040248

29	0.039894	0.040232	0.039143	0.040180	0.039365
30	0.039608	0.041065	0.038961	0.039895	0.040071
31	0.039157	0.039318	0.039096	0.039437	0.039374
32	0.039555	0.040266	0.039431	0.041329	0.039146
33	0.039626	0.043057	0.040090	0.040880	0.041340
34	0.039741	0.039567	0.039395	0.039620	0.039798
35	0.039834	0.039085	0.040907	0.040259	0.040890
36	0.038656	0.038997	0.039552	0.040827	0.040168
37	0.040223	0.039385	0.040171	0.039234	0.040303
38	0.039277	0.039583	0.040997	0.039713	0.039760
39	0.040438	0.041569	0.039614	0.040349	0.039454
40	0.040387	0.039273	0.039579	0.039802	0.039593

Del mismo modo, se generó una tabla con los valores estadísticos obtenidos a partir de la muestra.

MEDIDA					
ESTADISTICA	N = 16000	N = 20000	N = 24000	N = 28000	N = 32000
<b>PROMEDIO</b>	0.039591	0.039932	0.039801	0.039996	<b>0.040141</b>
<b>MINIMO</b>	0.038444	0.038997	0.038679	0.038991	<b>0.039146</b>
<b>MAXIMO</b>	0.040894	0.043057	0.042169	0.041329	<b>0.041680</b>
<b>DESVIACION ESTANDAR</b>	0.000566	0.000757	0.000628	0.000547	<b>0.000678</b>

Finalmente, se puede observar que la media del algoritmo de búsqueda Tabú cuando el número de iteraciones es 32000 aun es mayor significativamente respecto de los otros valores propuestos. En base a esta premisa, se escoge el valor de 32000 como el valor calibrado para el número de iteraciones ya que posee la mejor media de todas las muestras realizadas durante la calibración.