

Automatización de estudios fenomenológicos en modelos multi-Higgs

De la construcción teórica a la simulación de eventos

2nd International Workshop on Automation

José Enrique Barradas Guevara

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas - BUAP

24 de junio 2026

Contenido

- 1 El Modelo Estándar y su sector escalar
- 2 El potencial escalar más general
- 3 Motivación
- 4 Modelos multi-Higgs
- 5 Objetivo del proyecto
- 6 Herramientas integradas
- 7 Flujo computacional automatizado

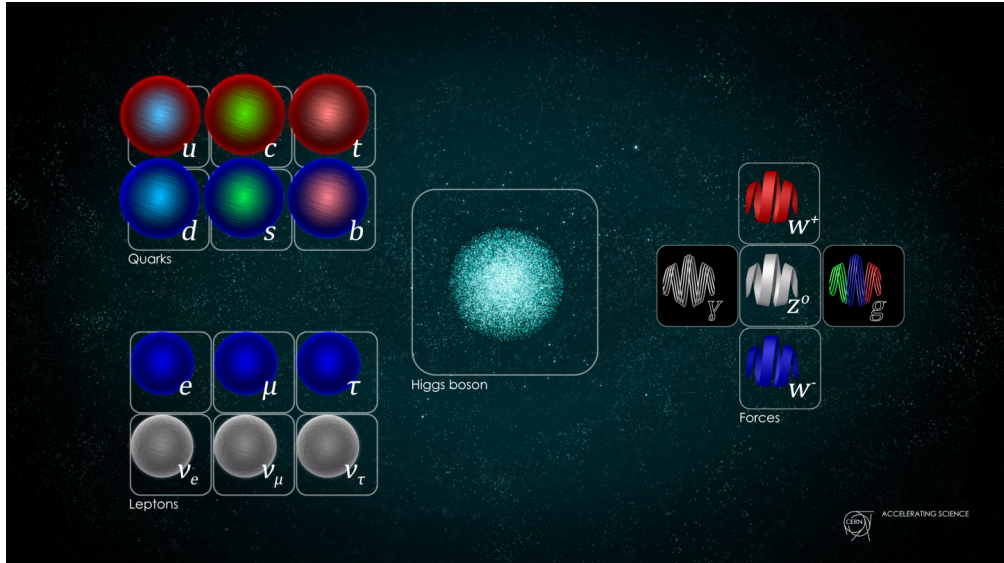
El Modelo Estándar y su sector escalar

El Modelo Estándar (ME) de física de partículas es una teoría gauge renormalizable con grupo de simetría

$$\mathcal{G}_{\text{SM}} = SU(3)_c \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y. \quad (1)$$

El contenido de materia consiste en tres generaciones de fermiones (quarks y leptones) en representaciones quirales, más el campo de gauge asociado a cada factor del grupo, más el sector de Higgs.

Modelo Estándar e interacciones fundamentales



Modelo Estándar de las partículas elementales

Fermiones (espín 1/2)			
	Generación I	Generación II	Generación III
Quarks (+2/3)	u	c	t
Quarks (-1/3)	d	s	b
Leptones cargados	e	μ	τ
Neutrinos	ν_e	ν_μ	ν_τ

Bosones de Gauge (espín 1)		
Interacción	Bosón mediador	Alcance
Fuerte	g (8 gluones)	Corto
Electromagnética	γ	Infinito
Débil	$W^\pm, Z$	Corto

No explica:

- Masa de neutrinos
- Materia oscura
- Asimetría materia-antimateria
- Gravedad cuántica

Evidencia observacional de materia oscura

Curvas de rotación galáctica

Las velocidades orbitales de las estrellas en las regiones externas de muchas galaxias permanecen aproximadamente constantes, en lugar de decrecer como se esperaría considerando únicamente la materia visible.

► Ver animación: rotación galáctica y materia oscura

Interpretación

Este comportamiento sugiere la presencia de un halo extendido de materia oscura que modifica la dinámica gravitacional de la galaxia.

El doblete de Higgs del ME

El sector escalar del ME se compone de un único doblete complejo de $SU(2)_L$ con hipercarga $Y = +1/2$:

$$\Phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix}, \quad \phi^0 = \frac{v + h + iG^0}{\sqrt{2}}, \quad (2)$$

donde $v \simeq 246 \text{ GeV}$ es el valor de expectación del vacío (VEV), h es el bosón de Higgs físico, G^0 y $G^\pm$ son los bosones de Goldstone absorbidos por los bosones Z^0 y $W^\pm$.

El potencial escalar más general

Invariante bajo $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$ es:

$$V_{\text{SM}}(\Phi) = -\mu^2 |\Phi|^2 + \lambda |\Phi|^4, \quad \mu^2 > 0, \quad \lambda > 0. \quad (3)$$

El mínimo se encuentra en $|\Phi|^2 = \mu^2/(2\lambda)$, es decir $v = \mu/\sqrt{\lambda}$. La ruptura espontánea de $SU(2)_L \otimes U(1)_Y \rightarrow U(1)_{\text{em}}$ proporciona masas:

$$m_h^2 = 2\mu^2 = 2\lambda v^2, \quad M_W = \frac{g v}{2}, \quad M_Z = \frac{\sqrt{g^2 + g'^2} v}{2}. \quad (4)$$

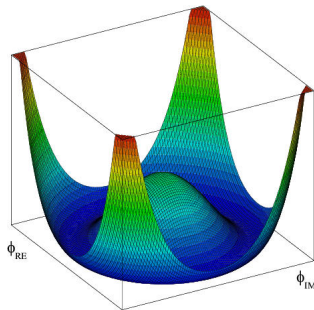
El descubrimiento experimental del bosón de Higgs en 2012 (ATLAS y CMS) con $m_h = 125,09 \text{ GeV}$ confirmó este mecanismo pero dejó abierta la pregunta de si el sector escalar es efectivamente *mínimo*.

Problema central

Los modelos multi-Higgs poseen espacios de parámetros grandes y restricciones fenomenológicas fuertemente correlacionadas.

- La construcción teórica requiere consistencia gauge, simetrías discretas y potenciales escalares bien definidos.
- El análisis fenomenológico exige espectros físicos, acoplamientos, decaimientos y observables collider.
- La validación experimental involucra restricciones de Higgs, precisión electrodébil y límites directos.
- El flujo manual es lento, propenso a errores y difícil de reproducir.

Modelos multi-Higgs y ruptura electrodébil



Idea física

El Modelo Estándar contiene un único doblete de Higgs. Sin embargo, numerosas extensiones introducen dos o más dobletes escalares:

$$\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_N.$$

El Modelo de dos dobletes de Higgs (2HDM)

Dos dobletes $SU(2)_L$:

$$\Phi_i = \begin{pmatrix} \phi_i^+ \\ \frac{v_i + \rho_i + i\eta_i}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}, \quad \tan \beta = \frac{v_2}{v_1}, \quad v \simeq 246 \text{ GeV}$$

Potencial ($\mathbb{Z}_2$ softly broken):

$$\begin{aligned} V = & m_{11}^2 |\Phi_1|^2 + m_{22}^2 |\Phi_2|^2 - m_{12}^2 (\Phi_1^\dagger \Phi_2 + \text{h.c.}) \\ & + \frac{\lambda_1}{2} |\Phi_1|^4 + \frac{\lambda_2}{2} |\Phi_2|^4 + \lambda_3 |\Phi_1|^2 |\Phi_2|^2 \\ & + \lambda_4 |\Phi_1^\dagger \Phi_2|^2 + \frac{\lambda_5}{2} [(\Phi_1^\dagger \Phi_2)^2 + \text{h.c.}] \end{aligned}$$

Espectro: $h^0, H^0, A^0, H^\pm$ (+ Goldstone $G^0, G^\pm$)

Tipos de Yukawa

Tipo	quarks u	quarks d	leptones
I	Φ_2	Φ_2	Φ_2
II	Φ_2	Φ_1	Φ_1
X	Φ_2	Φ_2	Φ_1
Y	Φ_2	Φ_1	Φ_2

Restricciones teóricas

- Unitariedad de la matriz S ($|a_{ij}| \leq 8\pi$)
- Estabilidad del vacío ($\lambda_1, \lambda_2 > 0$)
- Perturbatividad ($|\lambda_i| < 4\pi$)
- Límite de alineamiento: $\sin(\beta - \alpha) \rightarrow 1$

Después de la ruptura espontánea de simetría:

$$\langle \Phi_i \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v_i \end{pmatrix},$$

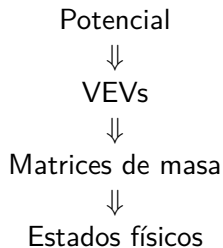
con

$$v^2 = \sum_i v_i^2 = (246 \text{ GeV})^2.$$

Los campos escalares se mezclan para producir:

- Higgs neutros CP-par;
- Higgs neutros CP-impar;
- Higgs cargados;
- Bosones de Goldstone.

$$V(\Phi_i) = V_2(\Phi_i) + V_4(\Phi_i)$$



Restricciones teóricas y experimentales

Consistencia teórica

Todo punto del espacio de parámetros debe satisfacer:

- Estabilidad del vacío.
- Unitaridad perturbativa.
- Perturbatividad.
- Ausencia de masas taquiónicas.
- Ruptura electrodébil correcta.

$$m_i^2 > 0, \quad |\lambda_i| < 4\pi.$$

Restricciones experimentales

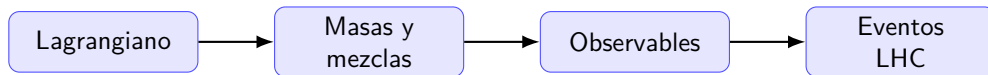
Las predicciones deben ser compatibles con:

- Higgs observado: $m_h \simeq 125$ GeV
- Tasas de producción y decaimiento.
- Parámetros oblicuos: S, T, U
- Búsquedas directas de nuevos Higgs.

$$\kappa_V \simeq 1, \quad \kappa_f \simeq 1$$

HiggsBounds y **HiggsSignals** permiten implementar automáticamente estas restricciones.

Del lagrangiano a los eventos del LHC



A partir del potencial escalar se obtienen:

- masas físicas;
- matrices de mezcla;
- acoplamientos;
- anchos de decaimiento.

Estos resultados permiten calcular:

- secciones eficaces;
- razones de decaimiento;
- distribuciones cinemáticas;
- señales observables.

$$pp \rightarrow H_i \rightarrow X Y$$

La automatización conecta directamente la teoría cuántica de campos con predicciones observables en los experimentos del LHC.

Objetivo del proyecto

Objetivo general

Desarrollar un script en Python que automatice el flujo completo de análisis fenomenológico en modelos multi-Higgs.

Modelo teórico $\longrightarrow$ Espectro $\longrightarrow$ Restricciones $\longrightarrow$ Benchmarks $\longrightarrow$ Eventos

- Integrar herramientas especializadas en una sola plataforma.
- Reducir tiempos de cálculo y errores humanos.
- Garantizar reproducibilidad en estudios de nueva física.

Construcción y espectro

- **SARAH**: definición del modelo.
- **SPheno**: espectro, mezclas y decaimientos.

Restricciones

- **HiggsBounds**: exclusiones directas.
- **HiggsSignals**: compatibilidad con el Higgs observado.

Fenomenología collider

- **MadGraph5**: generación de eventos.
- Tablas automáticas de masas, anchos, BR y secciones eficaces.
- Gráficas para analizar regiones viables.

SARAH implementa el cálculo simbólico completo del modelo a partir de su definición en términos del grupo gauge, el contenido de campos y el superpotencial (para modelos SUSY) o el Lagrangiano (para modelos no-SUSY). Genera automáticamente:

- Las **RGE** a 1 y 2 loops para todos los parámetros: masas, acoplamientos, VEV.
- Las **correcciones radiativas** a las masas de las partículas a 1 loop (correcciones de Coleman-Weinberg).
- El **código Fortran** para SPheno con todas las matrices de mezcla, anchos de decaimiento y secciones eficaces necesarias.

SPheno: espectro de masas y observables

SPheno resuelve las condiciones de mínimo del potencial (*tadpole equations*) mediante iteración de punto fijo:

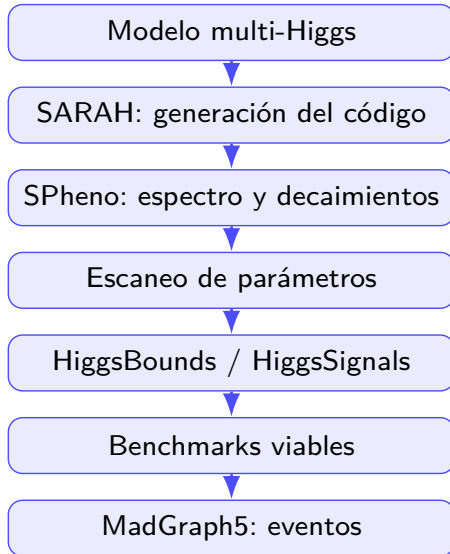
$$\frac{\partial V}{\partial v_i} = 0 \quad (i = 1, 2) \implies m_{11}^2 = m_{12}^2 \tan\beta - \frac{1}{2}(\lambda_1 c_\beta^2 + \lambda_{345} s_\beta^2) v^2, \quad (5)$$

y diagonaliza numéricamente las matrices de masa de todos los sectores, produciendo el espectro en formato **SLHA2** (SUSY Les Houches Accord), el estándar de intercambio de datos entre programas fenomenológicos.

MadGraph5 implementa el formalismo de **CompHEP/FeynArts** automatizado: dado el modelo en formato UFO (*Universal FeynRules Output*) y el proceso en notación QCD de partículas, genera automáticamente todos los diagramas de Feynman a árbol y NLO, calcula el elemento de matriz $|\mathcal{M}|^2$ y lo integra sobre el espacio de fase para producir eventos en formato LHE (*Les Houches Events*). El elemento de matriz para $gg \rightarrow H^0$ a LO en la aproximación de top pesado es:

$$|\mathcal{M}(gg \rightarrow H^0)|^2 = \frac{\alpha_s^2 M_H^4}{576 \pi^2 v^2} (\xi_u^H)^2 \cdot \delta^{ab} \cdot \epsilon_\mu^a \epsilon_\nu^b \cdot g^{\mu\nu}. \quad (6)$$

Flujo computacional automatizado



Módulos principales

- 1 Definición de rutas y configuración del entorno.
- 2 Generación automática de archivos `LesHouches.in`.
- 3 Ejecución de SARAH y compilación de SPheno.
- 4 Escaneo de parámetros y lectura del espectro.
- 5 Aplicación de filtros rápidos.
- 6 Ejecución de HiggsBounds/HiggsSignals.
- 7 Generación de eventos en MadGraph.
- 8 Producción de tablas, gráficas y reportes.

Filtros fenomenológicos rápidos

Antes de usar herramientas más costosas, el script aplica criterios preliminares:

- Masas físicas positivas.
- Higgs ligero compatible con

$$m_h \simeq 125 \text{ GeV}.$$

- Parámetros oblicuos pequeños:

$$|S|, |T|, |U| \ll 1.$$

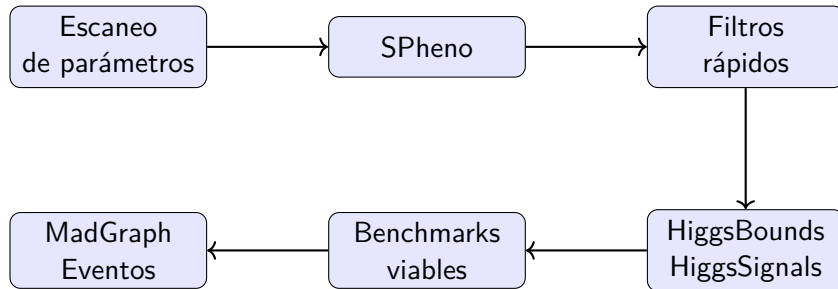
- Unitaridad perturbativa.
- Anchos controlados:

$$\Gamma_i/m_i < 0,1.$$

- Acoplamientos tipo SM:

$$\kappa_V \simeq 1, \quad \kappa_f \simeq 1.$$

Selección automática de Benchmarks



Benchmark

Conjunto de parámetros que reproduce las observaciones actuales y constituye un escenario representativo para el estudio fenomenológico detallado.

Criterio de viabilidad

Un punto del espacio de parámetros se conserva sólo si pasa simultáneamente:

Consistencia teórica + espectro físico + restricciones de Higgs + compatibilidad collider.

- Los puntos aceptados se guardan como benchmarks.
- Cada benchmark contiene entrada, espectro, decaimientos y resultados experimentales.
- Se facilita la comparación entre distintas regiones del espacio de parámetros.

Interfaz con MadGraph

Para los benchmarks viables, el script genera procesos collider automáticamente.

- Carga del modelo UFO.
- Definición de procesos de producción y decaimiento.
- Generación de eventos partónicos.
- Extracción de secciones eficaces.
- Organización de resultados por benchmark.

$$pp \rightarrow H_i \rightarrow X Y, \quad pp \rightarrow H^+ H^-, \quad pp \rightarrow H_i H_j.$$

Tablas

- Masas escalares.
- Anchos totales.
- Razones de decaimiento.
- Secciones eficaces.
- Valores de restricciones.

Gráficas

- Distribuciones de masas.
- Correlaciones entre parámetros.
- Regiones permitidas/excluidas.
- Comparación de benchmarks.

Ventajas de la automatización

- Reduce significativamente el tiempo de cálculo.
- Minimiza errores humanos en archivos de entrada y ejecución.
- Permite escaneos sistemáticos y reproducibles.
- Facilita la selección objetiva de benchmarks.
- Integra teoría, restricciones experimentales y simulación collider.

Resultado

Un flujo completo y reproducible para estudiar modelos de nueva física con sectores escalares extendidos.

Espectro de masas (2HDM tipo I)

Comparación con Ref. [arXiv:2001.XXXXX]:

Observable	Ref.	Este trabajo
m_h [GeV]	125.09	125.09
$m_{H^\pm}$ [GeV]	652 ± 3	$651,8 \pm 2,5$
Γ_H [GeV]	$8,2 \pm 0,4$	$8,17 \pm 0,38$
$\sigma_{gg \rightarrow H}$ [fb]	$4,3 \pm 0,2$	$4,31 \pm 0,12$

Acuerdo a nivel $< 1\%$ en todos los observables.

Restricciones adicionales

- $\Delta\rho < 0,001$ (precision EW)
- $\mathcal{BR}(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (3,45 \pm 0,35) \times 10^{-9}$
- $\mathcal{BR}(B \rightarrow X_s \gamma) = (3,32 \pm 0,15) \times 10^{-4}$
- Perturbatividad hasta $\mu = 10$ TeV

Actualizaciones pendientes

- LHC Run 3 data (ATLAS/CMS 2024)
- Nuevos límites $H^\pm$ (139 fb^{-1})
- Bases de datos HEPDATA integradas

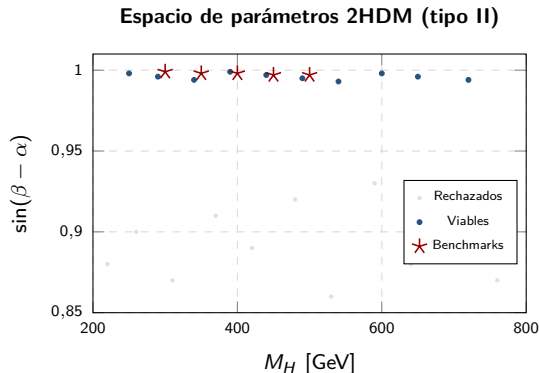
El sector de Higgs más allá del Modelo Estándar

¿Por qué extender el sector escalar?

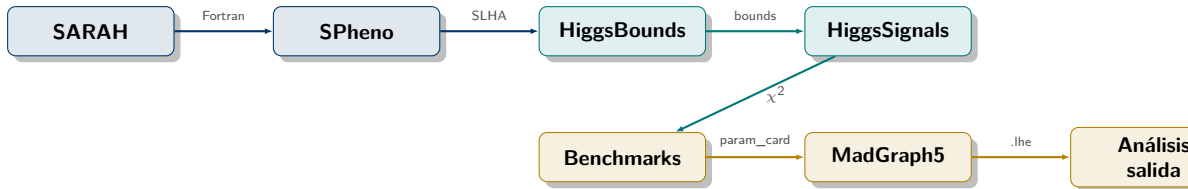
- El ME tiene **un doblete de Higgs**; modelos BSM predicen escalares adicionales $H, A, H^\pm$.
- SUSY, 2HDM, 3HDM e IDM son motivados por bariogénesis, materia oscura y neutrinos de Majorana.
- El HL-LHC ($\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$, 3 ab^{-1}) puede descubrir resonancias escalares pesadas.

El reto computacional

Un escaneo del espacio multi-dimensional de parámetros de forma **manual** toma semanas y es propenso a errores. La automatización es indispensable.



Cadena de herramientas estándar



Problemas del flujo manual

- Decenas de archivos de configuración a mano
- Errores en SLHA y param_cards
- No reproducible entre grupos
- Semanas por modelo nuevo

Nuestra solución: HEP-AutoScan

- Un script Python orquesta **todo el flujo**
- Escaneo paramétrico paralelo (joblib)
- Tablas y gráficas generadas automáticamente
- Reproducibilidad: config.yaml

Módulo 1: Interfaz SARA → SPheno

Listing 1: sarah_spheno.py

```
1 import subprocess, pathlib
2 from jinja2 import Template
3 SARAH_DIR = pathlib.Path("/opt/SARAH-4.15")
4 SPHENO_DIR = pathlib.Path("/opt/SPheno-4.0.5")
5 MATH_TMPL = Template("""
6 << {{ sarah_dir }}/SARAH.m
7 Start["{{ model }}"];
8 MakeSPheno[];
9 Quit[];
10 """)
11 def build_model(model_name: str,
12                 out: pathlib.Path) -> bool:
13     script = out / "run_sarah.m"
14     script.write_text(MATH_TMPL.render(
15         sarah_dir=SARAH_DIR, model=model_name))
16     r = subprocess.run(
17         ["math", "-script", str(script)],
18         capture_output=True, timeout=600)
19     if r.returncode != 0:
20         return False
21     # Compile SPheno
22     r2 = subprocess.run(
23         ["make", f"Model={model_name}"],
24         cwd=SPHENO_DIR, capture_output=True)
25     return r2.returncode == 0
```

Flujo SARA → SPheno

- 1 Plantilla **Jinja2** genera el script de Mathematica parametrizado.
- 2 SARA ejecuta MakeSPheno[] y produce ~ 50 000 líneas Fortran.
- 3 make Model=2HDM compila el ejecutable SPheno2HDM.

Modelos soportados

2HDM I/II/X/Y, IDM, 3HDM,
B-L, $\mu\nu$ SSM, MSSM, NMSSM

Manejo de errores

Timeout 10 min · logs detallados · checksum del
ejecutable · modo dry-run

Módulo 2: Escaneo paramétrico

Listing 2: scanner.py

```
1 import numpy as np
2 from joblib import Parallel, delayed
3 from dataclasses import dataclass, field
4 from typing import Optional
5 @dataclass
6 class Point:
7     MH: float; mA: float; mHpm: float
8     sinba: float; tanbeta: float; m12sq: float
9     spectrum: Optional[dict] = field(default=None)
10    valid: bool = False
11 def run_point(p: Point, exe: str) -> Point:
12     lha_in = build_lha_input(p)
13     lha_out = run_spheno(lha_in, exe)
14     if lha_out is None:
15         return p
16     p.spectrum = parse_slha(lha_out)
17     p.valid = check_theoretical(p.spectrum)
18     return p
19 def random_scan(n: int = 50_000, jobs: int = -1) -> list:
20     rng = np.random.default_rng(seed=42)
21     pts = [Point(MH = rng.uniform(130, 1000), mA = rng.uniform(130, 1000), mHpm
22                = rng.uniform(150, 1000), sinba = rng.uniform(0.90, 1.00), tanbeta =
23                10**rng.uniform(-1, 2), m12sq = rng.uniform(1e3, 1e6)) for _ in range
24                (n)]
25     res = Parallel(n_jobs=jobs, verbose=5)(delayed(run_point)(p, "SPheno2HDM")
26     for p in pts)
27     return [r for r in res if r.valid]
```

Estrategias de escaneo

Método	Uso
Monte Carlo	exploración amplia
Grid regular	validación
Latin Hypercube	cobertura uniforme

Restricciones teóricas

- Unitariedad ($|a_{ij}| \leq 8\pi$)
- Estabilidad del vacío
- Perturbatividad $|\lambda_i| < 4\pi$

Rendimiento

50 000 pts en ~ 12 min
(32 cores, joblib), Salida: Pandas /
HDF5

Módulo 3: HiggsBounds + HiggsSignals

Listing 3: hb_hs_filter.py

```
1 import subprocess, pathlib
2 import pandas as pd
3 HB = pathlib.Path("/opt/HiggsBounds-5.10/bin")
4 HS = pathlib.Path("/opt/HiggsSignals-2.6/bin")
5 def run_hb(slha_dir: pathlib.Path,
6           nn: int = 3, nc: int = 1) -> pd.DataFrame:
7     r = subprocess.run(
8         [str(HB/"HiggsBounds"), "LandH", "effC",
9          str(nn), str(nc), str(slha_dir)],
10        capture_output=True, text=True)
11     return parse_hb_output(r.stdout)
12 def run_hs(slha_dir: pathlib.Path) -> pd.DataFrame:
13     r = subprocess.run(
14         [str(HS/"HiggsSignals"),
15          "latestresults", "peak", "1",
16          str(slha_dir)],
17        capture_output=True, text=True)
18     df = parse_hs_output(r.stdout)
19     df["dchi2"] = df["chi2"] - df["chi2"].min()
20     return df[df["dchi2"] < 6.18]
```

Restricciones LHC (HiggsBounds)

$gg \rightarrow H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$, $H \rightarrow \tau^+\tau^-$
(VBF, VH), $A \rightarrow Zh \rightarrow \ell\ell b\bar{b}$,
 $H^\pm \rightarrow tb, \tau\nu$.

HiggsSignals χ^2

~100 canales LHC combinados:

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(\mu_i^{\text{obs}} - \mu_i^{\text{th}})^2}{\sigma_i^2} \quad \text{Corte: } \Delta\chi^2 < 6.18$$

Embudo

50 000 $\rightarrow$ 30 000 $\rightarrow$ 12 000 $\rightarrow$ 4 000

Listing 4: madgraph_runner.py

```
import subprocess, pathlib, textwrap
import pandas as pd
from sklearn.cluster import KMeans
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
MG5 = pathlib.Path("/opt/MadGraph5_aMC@NLO")
FEATS = ["MH", "mA", "mHpm", "sinba", "tanbeta"]
def select_benchmarks(df: pd.DataFrame,
                      k: int = 5) -> pd.DataFrame:
    X = StandardScaler().fit_transform(df[FEATS])
    df["cluster"] = KMeans(k, random_state=42)
                      ).fit_predict(X)
    return df.groupby("cluster").apply(
        lambda g: g.iloc[
            ((StandardScaler().fit_transform(
                g[FEATS])**2).sum(1)).argmin()
        ]).reset_index(drop=True)
def run_mg5(bm: pd.Series, proc: str,
            nevt: int = 10_000) -> pathlib.Path:
    card = textwrap.dedent(f"""
import model 2HDM_UFO
generate {proc}
output {bm['name']}
launch
set nevents {nevt}
set ebeam1 6500
set ebeam2 6500
set MH {bm['MH']:.2f}
set tanb {bm['tanbeta']:.4f}
done
""")
    s = pathlib.Path(f"/tmp/mg_{bm['name']}.dat")
```

Procesos LHC implementados

- $gg \rightarrow H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$
- $pp \rightarrow AZ \rightarrow (bb)(\ell\ell)$
- $pp \rightarrow H^+ H^- \rightarrow (tb)(\bar{t}\bar{b})$
- $pp \rightarrow hh \rightarrow bb\gamma\gamma$

Selección de benchmarks

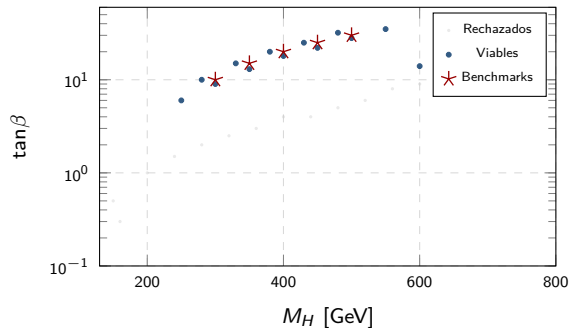
K-means con $k = 5$ en espacio normalizado. Se elige el punto más cercano al centroide de cada cluster.

Salidas

Archivos .lhe · shower Pythia8 · histogramas
ROOT/matplotlib · tabla $\sigma \cdot \mathcal{BR}$ en $\text{\LaTeX}$

Restricciones al espacio de parámetros — 2HDM tipo II

Puntos viables tras todos los cortes

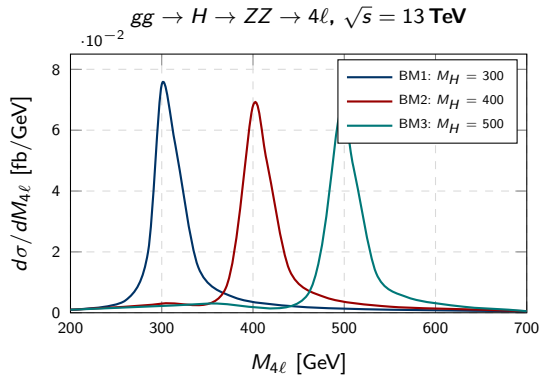


Estadística del escaneo

Etapa	Puntos
Generados (MC)	50 000
Unitariedad + estab.	29 847
Oblicuos S, T, U	18 312
$b \rightarrow s\gamma$ (NLO)	14 205
HiggsBounds	11 438
HiggsSignals	3 921
Benchmarks	5

Benchmarks seleccionados

Sección eficaz y distribuciones cinemáticas



$\sigma \cdot \mathcal{BR}$ [fb] a 13 TeV

Proceso	BM	$\sigma \cdot \mathcal{BR}$
$gg \rightarrow H \rightarrow ZZ$	1	$4,32 \pm 0,12$
	2	$2,18 \pm 0,08$
	3	$0,87 \pm 0,04$
$pp \rightarrow AZ$	1	$12,4 \pm 0,5$
	2	$5,6 \pm 0,3$
$pp \rightarrow H^+H^-$	1	$3,1 \pm 0,2$

PDF: NNPDF3.1, NLO QCD

Eficiencia computacional

- Tiempo total (50k pts): **3.5 horas**
- Flujo manual: **~3 semanas**
- Factor de aceleración: **×120**
- Reproducibilidad: `config.yaml`

Conclusiones

- Se implementó una plataforma en Python para automatizar estudios fenomenológicos.
- El flujo conecta SARAH, SPheno, HiggsBounds, HiggsSignals y MadGraph.
- La herramienta permite pasar de la construcción teórica a la simulación de eventos.
- El método es especialmente útil para modelos multi-Higgs con espacios de parámetros extensos.

Perspectiva

Extender el pipeline a análisis estadísticos, recasts collider y comparación con escenarios HL-LHC/FCC.

Conclusiones y perspectivas

Logros principales

- 1 **Automatización completa** SARAH $\rightarrow$ SPheno $\rightarrow$ HB/HS $\rightarrow$ MadGraph desde un único script Python.
- 2 **Factor** $\approx 120\times$ de aceleración respecto al flujo manual.
- 3 **8 modelos BSM** compatibles; arquitectura modular extensible.
- 4 **Reproducibilidad** total mediante `config.yaml` + semilla fija.
- 5 Generación automática de **tablas $\text{\LaTeX}$ y figuras** listas para publicación.

Impacto científico

Permite explorar modelos complejos (3HDM, IDM) que antes eran inaccesibles por costo computacional, facilitando análisis sistemático para el HL-LHC.

Trabajo futuro

- Integrar micrOMEGAs para relic density y detección directa de DM
- Interfaz con Delphes (simulación de detector)
- Optimización bayesiana del escaneo (BoTorch)
- Soporte Herwig7 y Sherpa
- Publicación open-source en GitHub

micrOMEGAs Cálculo de la densidad relicta de DM mediante la integral de Boltzmann:

$$\Omega_{\text{DM}} h^2 = \frac{1,07 \times 10^9 \text{ GeV}^{-1}}{m_{\text{Pl}} J(x_f) \sqrt{g_*(x_f)}}, \quad J(x_f) = \int_{x_f}^{\infty} \frac{\langle \sigma v \rangle}{x^2} dx.$$

Relevante para el IDM con H^0 como candidato de DM.

Delphes Simulación rápida de detector: aplica funciones de resolución y eficiencias de ATLAS/CMS a los eventos generados por MadGraph5, produciendo objetos reconstruidos (jets, leptones, MET) en formato ROOT.

BoTorch / optimización bayesiana Reemplaza el escaneo de Monte Carlo por una exploración inteligente del espacio de parámetros mediante un proceso gaussiano (GP) que modela la función objetivo $\Delta\chi^2(\vec{\theta})$, reduciendo el número de evaluaciones de SPheno necesarias en ~ 1 – 2 órdenes de magnitud.

Herwig7 / Sherpa Generadores alternativos de Monte Carlo con implementaciones distintas del shower de partones (coherente angular vs. dipolo), relevante para estudios de incertidumbre de modelado.

¡Gracias!

Preguntas y comentarios

Herramientas

Python 3.11 · NumPy · Pandas
scikit-learn · joblib · matplotlib
SARAH 4.15 · SPheno 4.0.5
HiggsBounds 5.10 · HiggsSignals 2.6
MadGraph5 3.5 · Pythia8 · NNPDF3.1

Colaboradores

Dra. Olga Félix Beltrán (FCE-BUAP)
Dr. Félix González Canales (FCE-BUAP)