



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE ELECTRICIDAD

ESTUDIOS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA DE GRAN SEÑAL DE MÁQUINAS
SINCRÓNICAS DE POLOS SALIENTES (MSPS) UTILIZANDO ATP-EMTP Y MODELS

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Eléctrico

AUTORES: WILMAN PAÚL CORREA LEÓN
JOSEMAR LEANDRO OROZCO SALAZAR
TUTOR: ING. JOSÉ MANUEL ALLER CASTRO, PhD.

Cuenca - Ecuador

2024

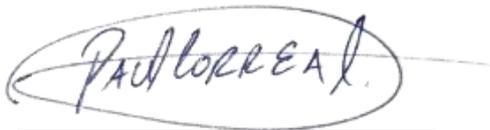
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Wilman Paúl Correa León con documento de identificación N° 0105205785 y Josemar Leandro Orozco Salazar con documento de identificación N° 0705711760; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 23 de julio del 2024

Atentamente,



Wilman Paúl Correa León

0105205785



Josemar Leandro Orozco Salazar

0705711760

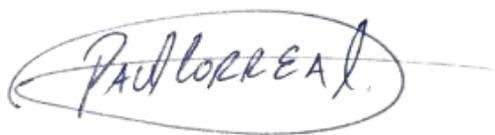
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Wilman Paúl Correa León con documento de identificación N° 0105205785 y Josemar Leandro Orozco Salazar con documento de identificación N° 0705711760, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: “Estudios de Estabilidad Transitoria de Gran Señal de Máquinas Sincrónicas de Polos Salientes (MSPS) utilizando ATP-EMTP y MODELS”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 23 de julio del 2024

Atentamente,



Wilman Paúl Correa León

0105205785



Josemar Leandro Orozco Salazar

0705711760

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, José Manuel Aller Castro con documento de identificación N°0151561800, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ESTUDIOS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA DE GRAN SEÑAL DE MÁQUINAS SINCRÓNICAS DE POLOS SALIENTES (MSPS) UTILIZANDO ATP-EMTP Y MODELS, realizado por Wilman Paúl Correa León con documento de identificación N° 0105205785 y por Josemar Leandro Orozco Salazar con documento de identificación N° 0705711760, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 23 de julio del 2024

Atentamente,



Ing. José Manuel Aller Castro, PhD.

0151561800

Estudios de Estabilidad Transitoria de Gran Señal de Máquinas Síncronas de Polos Salientes (MSPS) utilizando ATP-EMTP y MODELS

Wilman P. Correa
Universidad Politécnica Salesiana
Cuenca, Ecuador
wcorreal1@est.ups.edu.ec

Josemar L. Orozco
Universidad Politécnica Salesiana
Cuenca, Ecuador
jorozcos@est.ups.edu.ec

Jose M. Aller
Universidad Politécnica Salesiana
Cuenca, Ecuador
jaller@ups.edu.ec

Resumen—Este trabajo presenta el análisis de estabilidad transitoria de gran señal en máquinas síncronas de polos salientes (MSPS) utilizando la herramienta ATP-EMTP y su entorno gráfico ATPDraw. Se desarrollaron los modelos de las máquinas utilizando programación en MODELS y se analizaron varias perturbaciones en la red, tales como cortocircuitos monofásicos a tierra, bifásicos, trifásicos y cambios bruscos de carga para evaluar la respuesta dinámica del sistema. Los resultados muestran la eficacia de estas herramientas para simular y evaluar la estabilidad transitoria, proporcionando información valiosa para mejorar el diseño y la operación del sistema eléctrico de potencia.

Index Terms—Máquinas síncronas de polos salientes, Transformación a vectores espaciales, Transformación de Park, ATP-EMTP, ATPDraw, Estabilidad transitoria.

NOMENCLATURA

MSPS	Máquina síncrona de polos salientes
SEP	Sistema eléctrico de potencia
FEM	Fuerza electromotriz
α	$\exp(j2\pi/3)$
f_{em}	Fuerza electromotriz
\vec{i}_s	Vector espacial de la corriente estática
L_d, L_q	Inductancias de Park
λ_d, λ_q	Enlaces de flujo $d - q$
λ_f	Enlace de flujo del campo
$\lambda_{ad}, \lambda_{aq}$	Enlaces de flujo amortiguadores
θ_r	Posición angular del rotor
ω_r	Velocidad angular del rotor
R_s	Resistencia del estator
R_f	Resistencia de campo
R_a	Resistencia del devanado amortiguador
T_e, T_m	Par eléctrico y mecánico
\vec{i}_s	Vector espacial del Voltaje del estator
VBR	Voltage behind reactance

I. INTRODUCCIÓN

La invención de la máquina síncrona durante el siglo XIX ha sido de suma importancia para el funcionamiento de los sistemas eléctricos, siendo el convertidor de energía más utilizado en la generación de electricidad [1], [2]. Estas

máquinas pueden ser de rotor liso si operan a altas velocidades o de rotor de polos salientes cuando giran a velocidades menores. La máquina síncrona es utilizada como generador y como elemento motriz debido a su eficacia para transformar energía [3]. Uno de los desafíos que se han presentado con el desarrollo tecnológico consiste en mantener la estabilidad transitoria de gran señal, cuando la MSPS enfrenta fallas o perturbaciones que afectan su capacidad de transferir potencia. Este problema requiere el desarrollo de herramientas de análisis del comportamiento de las MSPS durante los fenómenos transitorios que pueden afectar la estabilidad del sistema de potencia [4].

En 1929, Park [5], [6] desarrolló la teoría de las dos reacciones para modelar la MSPS. Esto permitió simplificar el modelo de esta máquina con la transformación de los devanados del estátor a un sistema de referencia que gira síncronicamente con el rotor. Esta transformación convierte la variación de las inductancias del estátor con la posición del rotor, a dos devanados d y q independientes de la posición angular [7].

A finales de la década de los 80, se desarrolló una nueva técnica de modelación de máquinas utilizando vectores espaciales [8]. Esto facilitó la transformación y simplificación de los modelos de las máquinas eléctricas, especialmente cuando contienen en su representación matrices cíclicas y simétricas [3], [9]–[11].

El modelo de la MSPS desarrollado en [7], mediante las herramientas ATP-EMTP y MODELS, emplea ecuaciones diferenciales y transformaciones para definir los flujos, corrientes, ángulo de rotación, velocidad angular y par eléctrico. Además, determina las tensiones detrás de las resistencias del devanado que se transfieren al circuito representado en el entorno gráfico de ATPDraw [12]. Utilizando vectores espaciales referidos al rotor, este modelo permite llevar a cabo la simulación de sistemas eléctricos de potencia y de este modo, realizar estudios sobre la estabilidad transitoria.

La estabilidad transitoria se refiere a la capacidad de un sistema eléctrico, en particular las máquinas síncronas, para mantener la sincronización y operación estable durante y después de eventos transitorios significativos. Estos eventos

pueden incluir perturbaciones como cortocircuitos, cambios bruscos en la carga o fallas en la red eléctrica, que provocan fluctuaciones temporales en las variables eléctricas, convirtiéndose en un indicador crucial de la capacidad del sistema para recuperarse y continuar suministrando energía eléctrica [13].

Garantizar la continuidad del suministro eléctrico en situaciones de perturbación es fundamental y las máquinas síncronas desempeñan un papel vital en este proceso, debido a que son el corazón de los sistemas de generación eléctrica. La estabilidad transitoria es una preocupación importante para los ingenieros eléctricos, porque el comportamiento de las máquinas y su capacidad para mantenerse sincronizadas son esenciales para prevenir apagones y asegurar un servicio eléctrico constante, especialmente en sistemas de gran escala [14].

II. METODOLOGÍA

Para analizar la estabilidad del sistema de potencia es necesario incorporar modelos precisos de las máquinas síncronas. En este sentido en este trabajo se plantean de forma resumida las ecuaciones que definen este comportamiento y se programan en la herramienta ATP-EMTP, utilizando el entorno gráfico ATPDraw y la programación en MODELS [15], [16]. Una vez desarrollados los modelos de motores y generadores en el entorno ATPDraw, se utiliza el programa para simular la estabilidad del sistema durante arranque de motores, operación de generadores y diferentes cortocircuitos monofásicos, bifásicos y trifásicos en las líneas de transmisión.

II-A. Modelo de la MSPS

En la Fig. 1 se presenta el modelo de una MSPS en el sistema de coordenadas dq . Este modelo se obtiene utilizando las transformaciones a vectores espaciales y la rotación del sistema de coordenadas estático al sistema de referencia del rotor. Esto se conoce en la literatura como Transformación de Park [6].

El modelo de la MSPS en ejes $d-q$ y en convención motor, considerando los devanados amortiguadores se plantea en [3] como:

$$[v_{abcf}] = [R_{abcf}] [i_{abcf}] + \frac{d}{dt} [\lambda_{abdf}] \quad (1)$$

$$T_e - T_m = J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (2)$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad (3)$$

donde,

$$[\lambda_{abdf}] = [L_{abdf}(\theta_r)] [i_{abcf}] \quad (4)$$

$$T_e = \frac{1}{2} [i_{abcf}]^t \frac{\partial}{\partial \theta_r} [L_{abdf}(\theta_r)] [i_{abcf}] \quad (5)$$

La transformación a vectores espaciales conservativa en potencia se define como,

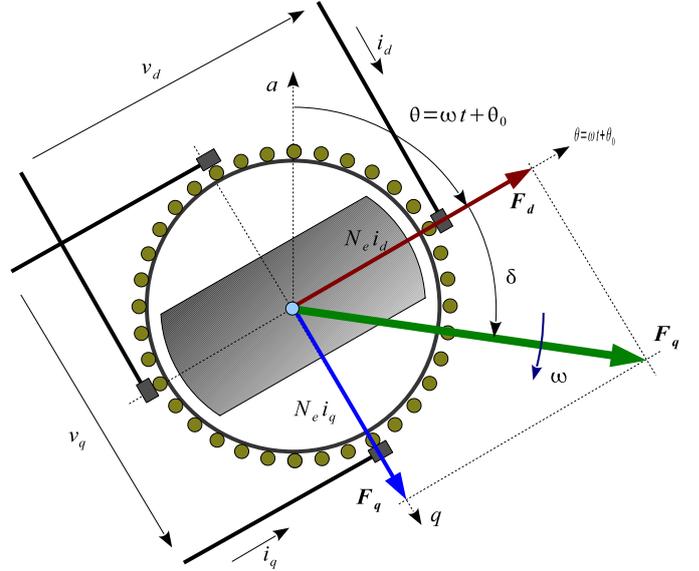


Figura 1: Modelo MSPS en vectores espaciales referidos al rotor [3]

$$\vec{x}_s = \sqrt{\frac{2}{3}} (x_a + \alpha x_b + \alpha^2 x_c), \quad (6)$$

y, la rotación se expresa mediante la transformación,

$$\vec{x}_s^{dq} = \vec{x}_s e^{-j\theta_r} = x_d + jx_q \quad (7)$$

Aplicar la transformación (6) a (1), (2) y (3), se obtiene:

$$\begin{cases} v_d = R_s i_d + p\lambda_d - \omega\lambda_q \\ v_q = R_s i_q + p\lambda_q + \omega\lambda_d \\ v_f = R_f i_f + p\lambda_f \\ v_{ad} = R_a i_{ad} + p\lambda_{ad} \\ v_{aq} = R_a i_{aq} + p\lambda_{aq} \end{cases} \quad (8)$$

donde,

$$\begin{cases} \lambda_d = L_d i_d + L_{df} i_f + L_{da} i_{ad} \\ \lambda_q = L_q i_q + L_{aq} i_{aq} \\ \lambda_f = L_f i_f + L_{df} i_d + L_{fa} i_{ad} \\ \lambda_{ad} = L_{ad} i_{ad} + L_{ad} i_d + L_{af} i_f \\ \lambda_{aq} = L_{aq} i_{aq} + L_{aq} i_q \end{cases} \quad (9)$$

y,

$$T_e = (L_d - L_q) i_d i_q + L_{df} i_q i_f + (L_{ad} i_{ad} i_q - L_{aq} i_{aq} i_d) \quad (10)$$

Con las corrientes i_d , i_q , i_f , i_{ad} y i_{aq} , obtenidas de (9), invirtiendo la matriz de inductancia $[L_{dq,f,ad,aq}]$ del MSPS, y multiplicando por los enlaces de flujo $[\lambda_{dq,f,ad,aq}]$ se determinan las fuerzas electromotrices de cada devanado como:

$$\begin{aligned} e_d &= p\lambda_d; e_q = p\lambda_d; e_f = p\lambda_f \\ e_{ad} &= p\lambda_{ad}; e_{aq} = p\lambda_{aq}, \end{aligned} \quad (11)$$

y desarrollando la transformación inversa desde las coordenadas d, q a las coordenadas a, b, c usando:

$$\begin{aligned} e_a &= \sqrt{\frac{2}{3}} \Re \{ (e_d + j e_q) e^{j\theta_r} \} \\ e_b &= \sqrt{\frac{2}{3}} \Re \{ \alpha^2 (e_d + j e_q) e^{j\theta_r} \} \\ e_c &= \sqrt{\frac{2}{3}} \Re \{ \alpha (e_d + j e_q) e^{j\theta_r} \} \end{aligned} \quad (12)$$

El modelo de la MSPS se implementa en el programa ATPDraw como se desarrolla en [7]. Este modelo incluye fuentes de voltaje de corriente alterna para las fases v_a, v_b y v_c , el voltaje de campo, y los voltajes de los devanados de amortiguador (v_{ad} y v_{aq}). El par mecánico (T_m), generado por la turbina, se incorpora utilizando una entrada programable TAC en MODELS.

Para calcular las corrientes $i_a, i_b, i_c, i_f, i_{ad}$ e i_{aq} , cada devanado se modela con un circuito que incluye una fuente de voltaje externa, su resistencia y la fuerza electromotriz. La FEM detrás de esta resistencia se calcula en MODELS mediante el modelo dinámico de la MSPS y se transfiere al circuito mediante fuentes de voltaje dependientes de TAC.

Para la inversión de la matriz de inductancia $[L_{dqf,ad,aq}]$, se aplica el método de Gauss-Jordan, adaptado a las matrices unidimensionales de MODELS. Los voltajes aplicados a las bobinas v_a, v_b y v_c se transforman al vector espacial y se rota a la referencia angular de la posición del rotor. Las FEM de cada devanado se transforman del sistema de coordenadas dq a a, b, c mediante transformaciones vectoriales inversas y se transfieren al circuito eléctrico en ATPDraw que se presenta en la Fig. 2.

EL código MODELS, adaptado para la modelación de la MSPS, incluyendo devanados amortiguadores, tanto para la condición motor o generador, se presenta en el listado 1.

```
MODEL SPSMO
DATA Ld {dflt:1}, Lq {dflt:0.6}, Lf {dflt:1.05}
DATA Lad {dflt:1}, Laq {dflt:0.6}, Ldf {dflt:0.8}, Ldad {dflt:0.9}, Lfad {dflt:0.85}
DATA Lqaq {dflt:0.55}, Re {dflt:0.01}, Rf {dflt:0.02}, Ra {dflt:0.03}
DATA H {dflt:1}
CONST SQRT23 {VAL:0.816496580927726}, SQRT12 {VAL:0.707106781186547}
CONST SQRT3_2 {VAL:0.866025403784439}
INPUT va, vb, vc, vad, vaq, Tm, vf
OUTPUT ea, eb, ec, ef, ead, eq, theta, wm, Te, id, iq
VAR ea, eb, ec, ef, theta, wm, Te, ptheta, pwm, thetal
VAR pLambdad, pLambdaq, pLambdaf, pLambdaad, pLambdaaq
VAR vx, vy, vd, vq, IEX, IEY, IE, FIE, DX, DY, DELTA
VAR ed, eq, ead, eq, ex, ey, ve, id, iq
--VAR Ld, Lq, Lf, Lad, Laq, Ldf, Ldad, Lfad, Lqaq
VAR L[1..50], L1[1..25], i, j, k, C[1..5], B[1..5], n, p
HISTORY
pLambdad {dflt:0}
integral (pLambdad) {dflt:0}
pLambdaq {dflt:0}
integral (pLambdaq) {dflt:0}
pLambdaf {dflt:0}
integral (pLambdaf) {dflt:0}
```

```
pLambdaad {dflt:0}
integral (pLambdaad) {dflt:0}
pLambdaaq {dflt:0}
integral (pLambdaaq) {dflt:0}
pwm {dflt:0}
integral (pwm) {dflt:0}
ptheta {dflt:0}
integral (ptheta) {dflt:0}
INIT -- inicializacion de variable e inversion [L]
n:=5
C[1]:=0 -- id
C[2]:=0 -- iq
C[3]:=0 -- if
C[4]:=0 -- iad
C[5]:=0 -- iaq
L[1..50]:=[Ld,0,Ldf,Ldad,0,1,0,0,0,0,
0,Lq,0,0,Lqaq,0,1,0,0,0,
Ldf,0,Lf,Lfad,0,0,0,1,0,0,
Ldad,0,Lfad,Lad,0,0,0,0,1,0,
0,Lqaq,0,0,Laq,0,0,0,0,1]
L1[1..25]:=[Ld,0,Ldf,Ldad,0, -- Matriz [L]
0,Lq,0,0,Lqaq,
Ldf,0,Lf,Lfad,0,
Ldad,0,Lfad,Lad,0,
0,Lqaq,0,0,Laq]
for i:=1 to n do
B[i]:=0;
for k:=1 to n do
B[i]:=B[i]+L1[n*(i-1)+k]*C[k] -- B=inv(L)*C
endfor
endfor
for i:=1 to n do -- i-> FILAS -- Gauss-Jordan
for j:=1 to n do -- j-> COLUMNAS
if i <> j THEN
p:=L[2*n*(j-1)+i]/L[2*n*(i-1)+i]
for k:=1 to 2*n do
L[2*n*(j-1)+k]:=L[2*n*(j-1)+k]-(L[2*n*(i-1)+k]*p)
endfor
endif
endfor
endfor
for i:=1 to n do
for j:=n+1 to 2*n do
L[2*n*(i-1)+j]:=L[2*n*(i-1)+j]/L[2*n*(i-1)+i]
endfor
endfor
theta:=0;wm:=0
for i:=1 to n do
B[i]:=0;
for k:=1 to n do -- Lambda=inv(L)*Corrientes
B[i]:=B[i]+L1[n*(i-1)+k]*C[k];
endfor
endfor
ENDINIT
EXEC
vx:=SQRT23*(va-0.5*vb-0.5*vc) -- Eq. (6)
vy:=SQRT12*(vb-vc)
vd:=vx*cos(theta)+vy*sin(theta) -- Eq. (7)
vq:=vy*cos(theta)-vx*sin(theta)
for i:=1 to n do
C[i]:=0;
for k:=1+n to 2*n do -- C=inv(L)*Lambda
C[i]:=C[i]+L[2*n*(i-1)+k]*B[k-n];
endfor
endfor
pLambdad :=vd-Re*C[1]+wm*B[2] -- Eqs. (8 y 9)
pLambdaq :=vq-Re*C[2]-wm*B[1]
pLambdaf :=vf-Rf*C[3]
pLambdaad:=vad-Ra*C[4]
pLambdaaq:=vaq-Ra*C[5]
B[1] :=integral (pLambdad) -- Lambdad
B[2] :=integral (pLambdaq) -- Lambdaq
B[3] :=integral (pLambdaf) -- Lambdaf
```

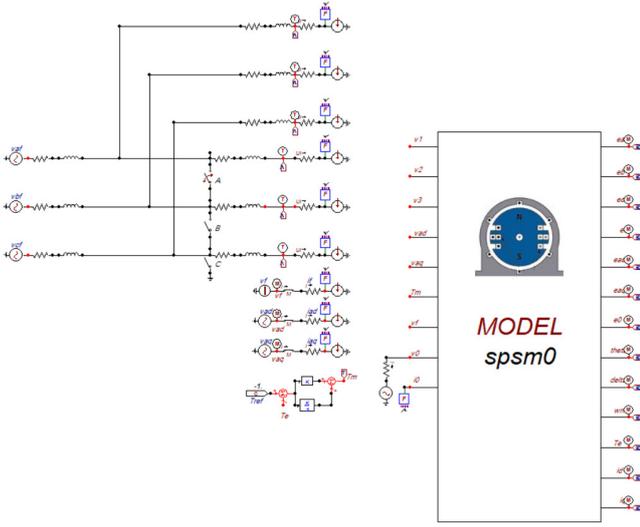


Figura 2: MSPPS modelo en ATPDraw usando MODELS

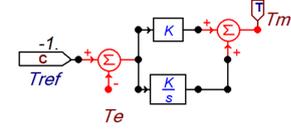


Figura 3: Modelo de la turbina y el gobernador mediante un PI

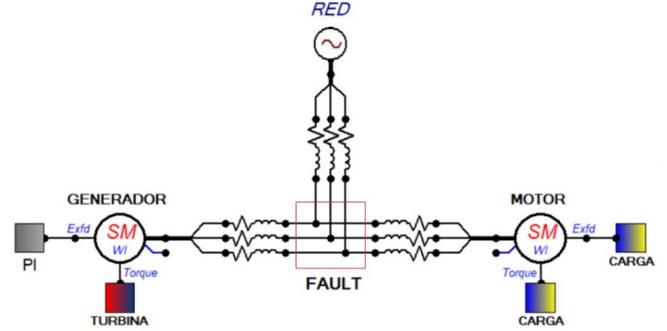


Figura 4: Modelo del sistema eléctrico de potencia

```

B[4] :=integral(pLambdaad) -- Lambdaad
B[5] :=integral(pLambdaaq) -- Lambdaaq
Te:=B[1]*C[2]-B[2]*C[1]
pwm:=(Te-Tm)/(2*H*377)
wm:=integral(pwm)
ptheta:=wm
theta:=integral(ptheta)
ed:=pLambdad-wm*B[2] -- Eq. (11)
eq:=pLambdaq+wm*B[1]
ef:=pLambdaf
ead:=pLambdaad
eaq:=pLambdaaq
ex:=ed*cos(theta)-eq*sin(theta)
ey:=ed*sin(theta)+eq*cos(theta);
ea:=SQRT23*ex -- Eq. (12)
eb:=SQRT23*(-0.5*ex+SQRT3_2*ey)
ec:=SQRT23*(-0.5*ex-SQRT3_2*ey)
id:=C[1]
iq:=C[2]

```

ENDEXEC
ENDDMODEL

Listado 1: Código para el modelo de la MSPPS con devanados amortiguadores en MODELS de ATP-EMTP

II-B. Modelo de la turbina y gobernador utilizando un PI

En la Fig. 3 se muestra el modelo de la turbina y el gobernador implementado mediante un controlador PI para obtener el par mecánico T_{m-ref} entregado a la MSPPS. Este controlador utiliza la referencia del par eléctrico para producir un par mecánico. Se utiliza el integrador para reducir el error permanente a cero y el proporcional para acelerar el ajuste y limitar el sobrepaso, con parámetros que pueden simular la operación de turbinas y reguladores típicos de las plantas de generación. Este modelo entrega el par mecánico como una señal al programa implementado en MODELS, donde se realiza la simulación digital de la dinámica de la MSPPS.

II-C. Modelo del sistema eléctrico de potencia

El modelo del sistema eléctrico de potencia utilizado para el análisis de la estabilidad transitoria se presenta en la Fig.

4. Este circuito interconectado consta de una red trifásica, un generador eléctrico y un motor. Ambas máquinas han sido modeladas utilizando el enfoque de VBR. Esto permite la combinación del modelo en ecuaciones diferenciales de la MSPPS con la simulación circuital del sistema eléctrico de potencia mediante elementos de ATP-EMTP.

III. RESULTADOS

En la Fig. 5 se muestran los interruptores A, B y C ubicados en la red de transmisión y las configuraciones utilizadas para generar las diferentes fallas eléctricas en el SEP, los interruptores se cierran durante $100 pu$ y después se abren, de esta forma se puede visualizar las corrientes, las velocidades y las diferencias angulares ocasionadas por las diferentes perturbaciones, así como la capacidad del SEP para recuperar la estabilidad.

Los tiempos de simulación se han establecido en el sistema en por unidad, considerando que el ángulo base es $1 rad$, por lo tanto:

$$\omega_B t_B = \alpha_B = 1 rad \Rightarrow \quad (13)$$

$$t_B = \frac{\alpha_B}{\omega_B} = \frac{1}{2\pi f} = \frac{1 rad}{377 \frac{rad}{s}} = 2,652 ms$$

III-A. Falla Línea-Línea

Esta falla se genera al cerrar el interruptor B, que se muestra en la Fig. 5, presentando los resultados en la Fig. 6.

En la Fig. 6a, se observa que antes de la falla, las corrientes en las tres fases son constantes y equilibradas, el cortocircuito inicia a los $300 pu$, tiempo en el cual se observa un pico de aproximadamente $5 pu$ en las fases B y C representadas por la curvas roja y verde respectivamente. La falla produce un aumento de diez veces la magnitud de la corriente en las fases en donde se genera la perturbación, con respecto a la

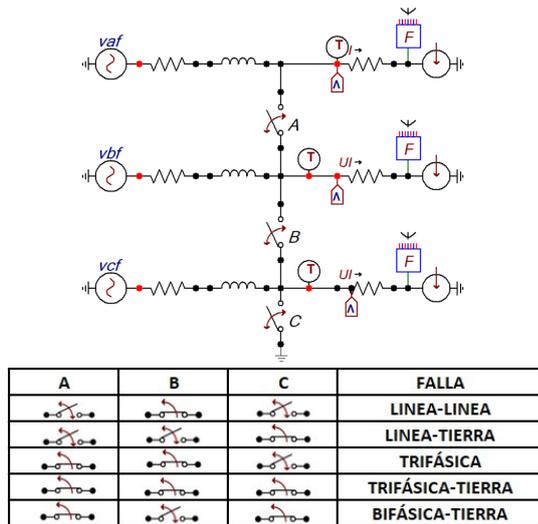


Figura 5: Interruptores situados en la red de transmisión del SEP para generar fallas eléctricas

magnitud en estado equilibrado antes del transitorio. La fase A , representada por la curva azul alcanza un pico de $3,0 pu$, debido al desequilibrio generado. A partir de los $430 pu$, las oscilaciones comienzan a reducirse significativamente en amplitud y frecuencia permitiendo al SEP recuperar su estado de operación normal.

La Fig. 6b representa las velocidades de ambas máquinas, mostrando que después de la perturbación, la velocidad mecánica del generador, representada por la curva azul, y el motor por la roja, experimentan una serie de oscilaciones de alta frecuencia y amplitud, alcanzando $1,02 pu$ y $1,05 pu$ respectivamente, cayendo a $0,97 pu$ y $0,91 pu$. A partir de los $600 pu$, ambas máquinas muestran una estabilización significativa en sus velocidades alcanzando el valor nominal de $1,0 pu$.

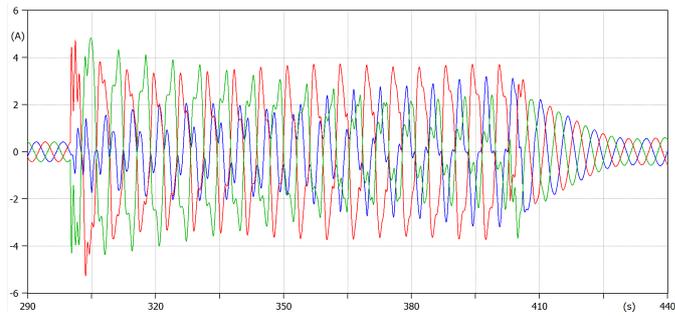
La Fig. 6c muestra la diferencia entre los ángulos rotóricos de las máquinas. A los $295 pu$, la magnitud es de $0,51 rad$. Durante la falla la diferencia aumenta hasta los $7,32 rad$, debido a la interrupción en el sistema eléctrico. El sistema se estabiliza a los $618 pu$ con una magnitud de $6,83 rad$, un valor equivalente a los $0,547 rad$ y muy cercano a las condiciones iniciales de operación.

III-B. Falla Línea-Tierra

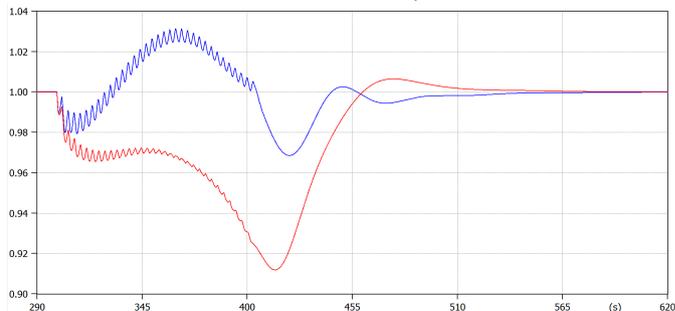
Esta falla se genera al cerrar el interruptor C , como se muestra en la Fig. 5, presentando los resultados en la Fig. 7.

La Fig. 7a muestra las corrientes del sistema, la fase C representada por la curva verde donde se observa un aumento en su magnitud, alcanzando un pico de aproximadamente $10 pu$ a los $300 pu$, mientras que las otras fases también muestran perturbaciones de menor magnitud debido al desequilibrio generado. Después de los $440 pu$, el sistema gradualmente retorna a un estado estable.

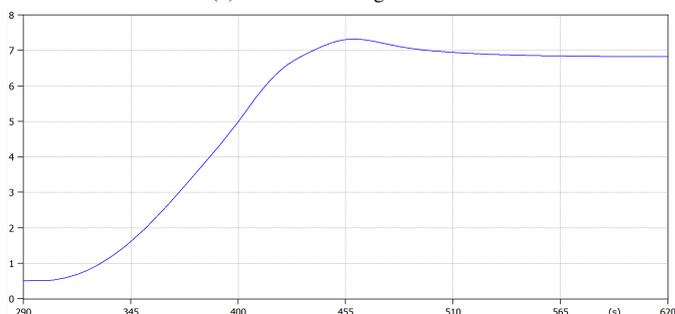
La Fig. 7b muestra que las velocidades mecánicas del generador y el motor que componen el SEP, experimentan oscila-



(a) Corrientes A, B y C



(b) Velocidades angulares ω_m



(c) Diferencia Angular δ_{1-2}

Figura 6: Resultados de la falla línea-línea en el punto de interconexión

ciones significativas durante la falla. Aproximadamente a los $600 pu$, ambas velocidades comienzan a retornar gradualmente a su estado sincrónico de $1 pu$.

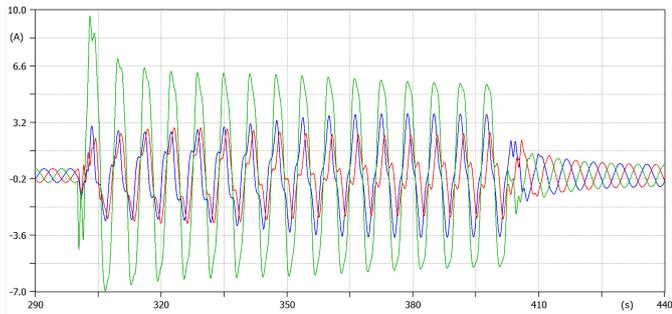
La Fig. 7c muestra un aumento del ángulo entre las máquinas, alcanzando los $1,93 rad$ y La estabilización del sistema se consigue a los $610 pu$, regresando a los $0,54 rad$, un valor aproximado al de la diferencia entre los ángulos antes de la falla.

III-C. Falla Trifásica

Esta falla se genera al cerrar los interruptores A y B , presentando los resultados en la Fig. 8.

En la Fig. 8a, se observa que las corrientes alcanzan magnitudes pico de hasta $8,6 pu$, posteriormente las oscilaciones decaen hasta alcanzar la estabilidad en un tiempo cercano a los $500 pu$.

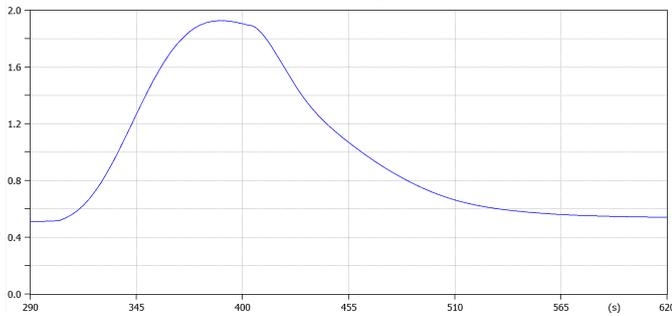
La Fig. 8b muestra que al ocurrir la falla, las velocidades se desestabilizan, el generador incrementa su velocidad mecánica,



(a) Corrientes A , B and C



(b) Velocidades Angulares ω_m



(c) Diferencia Angular δ_{1-2}

Figura 7: Resultados de la falla línea-tierra en el punto de interconexión

alcanzando un pico de $1,1 pu$, alrededor de los $400 pu$, mientras que el motor reduce su velocidad en el mismo intervalo llegando a $0,77 pu$. La estabilización de las velocidades ocurre después de los $640 pu$, con ambas máquinas retornando a su velocidad nominal.

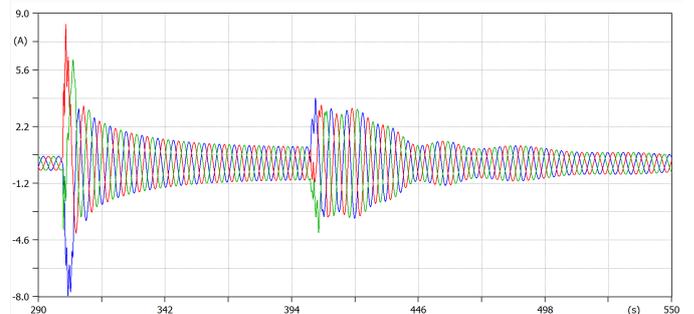
La Fig.8c muestra que el sistema se estabiliza en un tiempo de $613 pu$, con una magnitud de $25,73 rad$ correspondiente a un ángulo de $0,597 rad$.

III-D. Falla Trifásica-Tierra

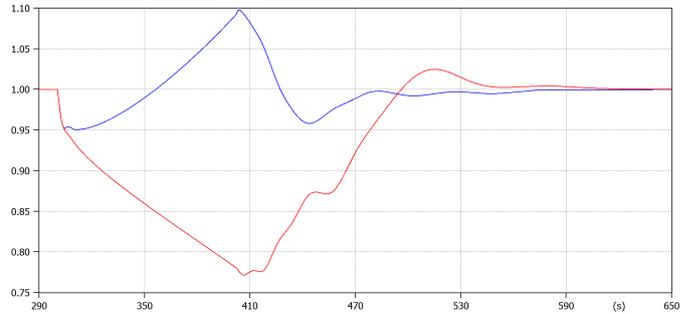
Esta falla se genera al cerrar los interruptores A , B y C , presentando los resultados en la Fig. 9.

En la Fig.9a, se observa que las corrientes al momento de la falla alcanzan picos aproximados de $4,2 pu$, en la fase A , $8,5 pu$ en la fase B y $6,3 pu$ en la fase C , posteriormente comienzan a estabilizarse alrededor de un tiempo de $500 pu$.

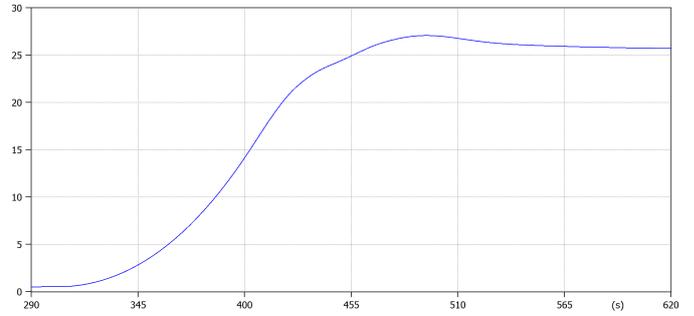
En la Fig.9b, se observa que la velocidad del generador desciende drásticamente a $0,95 pu$, mientras que la del motor



(a) Corrientes A , B and C



(b) Velocidades Angulares ω_m



(c) Diferencia Angular δ_{1-2}

Figura 8: Resultados de la falla trifásica en el punto de interconexión

desciendo a $0,77 pu$, al inicio de la falla. En el tiempo de $640 pu$, las velocidades comienzan a estabilizarse y se acercan nuevamente a la operación nominal.

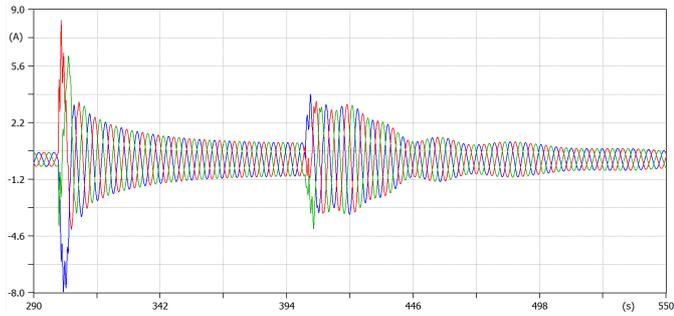
La Fig.9c muestra que en el tiempo de $641 pu$ la magnitud de la diferencia angular alcanza los $25,69 rad$, un valor equivalente a los $0,557 rad$ y muy cercano a las condiciones iniciales de operación.

III-E. Falla Bifásica-Tierra

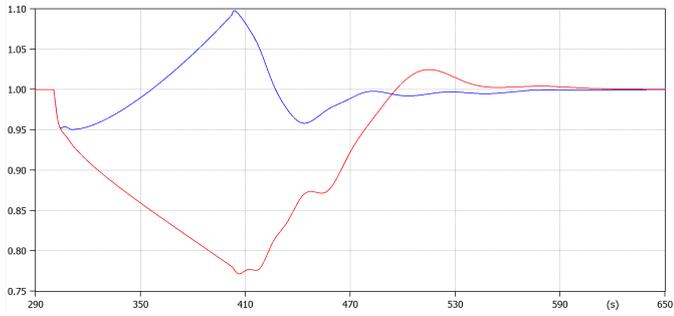
Esta falla se genera al cerrar los interruptores A y C , y los resultados se presentan en la Fig. 10.

En la Fig.10a, se observa que las corrientes al momento de la falla alcanzan picos de $5 pu$ en la fase A , $7 pu$ en la fase B y $8,6 pu$ en la fase C . La estabilización del sistema se recupera en un tiempo aproximado de $500 pu$.

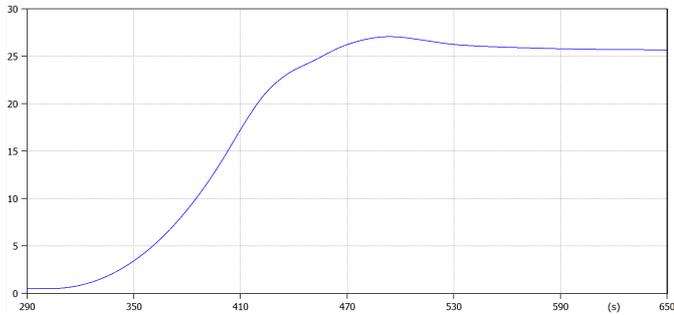
En la Fig.10b, se muestra que después de la falla, el generador incrementa su velocidad hasta $1,07 pu$ y el motor



(a) Corrientes A , B and C



(b) Velocidades Angulares ω_m



(c) Diferencia Angular δ_{1-2}

Figura 9: Resultados de la falla trifásica-tierra en el punto de interconexión

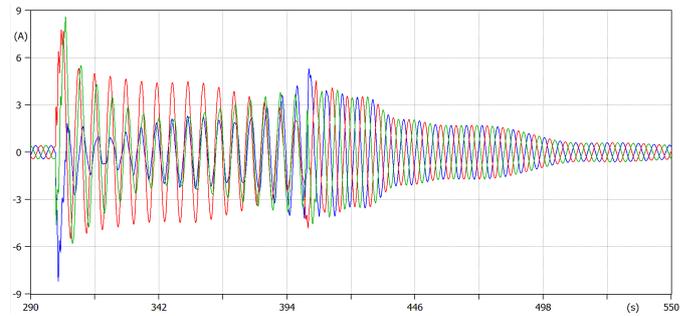
hasta $1,01 pu$. El sistema recupera la operación normal en un tiempo de $610 pu$.

La Fig.10c muestra que el sistema se estabiliza a los $614 pu$ con una magnitud de $31,96 rad$, correspondiente a un ángulo de $0,544 rad$.

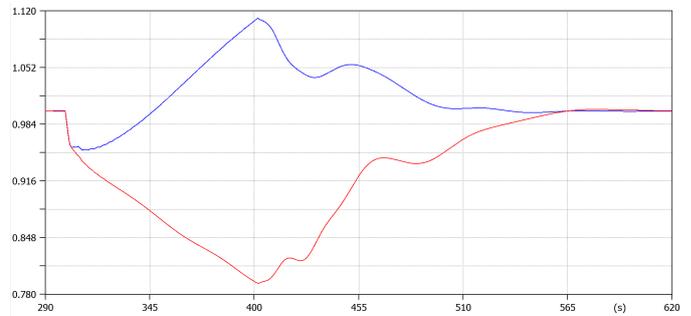
IV. CONCLUSIONES

En este trabajo, se aplicó el modelo de la MSPS desarrollado en ATPDraw, TACS y MODELS para estudiar la estabilidad transitoria de un sistema de potencia con dos máquinas conectadas a la red, una funcionando como motor y la otra como generador.

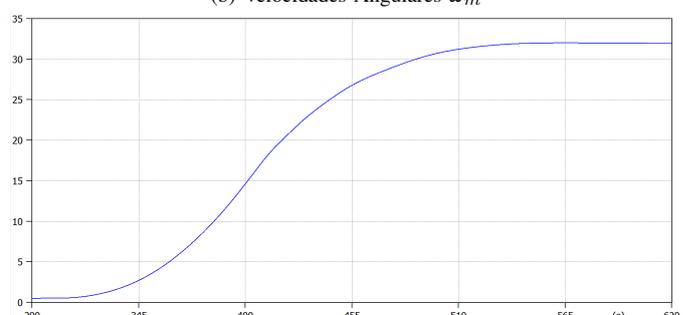
Los resultados obtenidos reflejan la efectividad del sistema para regresar a un estado estable después de una perturbación significativa. El análisis detallado de diferentes variables, tales como la velocidad angular, el ángulo de carga, el par eléctrico y las corrientes del estator ofrecen una visión integral de la dinámica del sistema en condiciones de falla, lo cual es



(a) Corrientes A , B and C



(b) Velocidades Angulares ω_m



(c) Diferencia Angular δ_{1-2}

Figura 10: Resultados de la falla bifásica-tierra en el punto de interconexión

esencial para el diseño y la operación segura de los sistemas de energía eléctrica.

Los resultados demuestran la versatilidad de ATP-EMTP y sus herramientas MODELS y TACS, así como el entorno gráfico de ATPDraw, para realizar este tipo de simulaciones. Las principales ventajas de estas herramientas son la velocidad del método trapezoidal para integrar las ecuaciones diferenciales, la precisión que se puede lograr, la simplicidad para realizar este tipo de modelado y la ventaja adicional de ser herramientas de uso gratuito, aunque requieran gestionar una licencia sin costo para el usuario. Todo esto facilita el desarrollo de nuevos prototipos para la operación, control y protección del sistema de energía eléctrica por parte de los investigadores en el campo, utilizando estas herramientas de simulación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su más sincero agradecimiento a la Universidad Politécnica Salesiana - Sede Cuenca y al Grupo de Investigación en Energía por todo el apoyo brindado para la realización de esta investigación. Su colaboración ha sido indispensable en todo el proceso. En particular, queremos destacar la guía y respaldo del director de nuestra carrera, el Ing. Marco Carpio, así como el apoyo fundamental de nuestro tutor, el Ing. José Aller.

REFERENCIAS

- [1] M. Doppelbauer, "The invention of the electric motor 1856-1893," *Elektrotechnisches Institut (ETI)*, 2012. <https://www.eti.kit.edu/english/1390.php> (visited: 2024-19-01).
- [2] S. P. Bordeau, "C. truman hibbard and the invention of automatic control for synchronous motors," *IEEE Transactions on Education*, vol. 23, pp. 163–169, Aug 1980.
- [3] J. M. Aller, *Máquinas eléctricas rotativas: Introducción a la teoría general*. Editorial Equinoccio, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela, 2008.
- [4] V. Vittal, J. D. McCalley, P. M. inventionson, and A. Fouad, *Power system control and stability*. John Wiley & Sons, 2019.
- [5] R. H. Park, "Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part i," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 48, pp. 716–727, July 1929.
- [6] R. H. Park, "Two-reaction theory of synchronous machines-ii," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 52, pp. 352–354, June 1933.
- [7] J. M. Aller, "Salient pole synchronous machine model using ATPDraw and MODELS including damper windings," in *2022 IEEE Sixth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, pp. 1–6, Oct 2022.
- [8] G. Retter, *Matrix and space-phasor theory of electrical machines*. Akadémiai Kiadó, 1987.
- [9] J. Aller, A. Bueno, and T. Paga, "Power system analysis using space-vector transformation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, pp. 957–965, Nov 2002.
- [10] A. Amador, A. Bueno, and J. M. Amador, "Modelo dinámico de la máquina sincrónica de polos salientes en vectores espaciales y su aplicación al control directo de par," *Ingeniería Energética*, vol. 30, no. 2, pp. 26–35, 2009.
- [11] S. Hemmati and S. A. Saeid, "A new method to model damper windings in the salient pole synchronous machine," in *2019 10th International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC)*, pp. 50–55, 2019.
- [12] J. M. Aller, J. A. Restrepo, and J. C. Viola, "Voltage behind reactance model of induction machines using ATPDraw and MODELS," in *2021 IEEE Fifth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, pp. 1–6, Oct 2021.
- [13] E. Kimbark, *Power Systems Stability, Volume III-Synchronous Machines*. a textbook published by John Wiley & Sons, Inc, New York, 1956.
- [14] C. Concordia, "Steady-state stability of synchronous machines as affected by voltage-regulator characteristics," *Electrical Engineering*, vol. 63, pp. 215–220, May 1944.
- [15] E. Haginomori, T. Koshiduka, J. Arai, and H. Ikeda, *Power system transient analysis: theory and practice using simulation programs (ATP-EMTP)*. John Wiley & Sons, 2016.
- [16] H. K. Høidalen, L. Prikler, and J. Hall, "ATPDraw-graphical preprocessor to atp, windows version," in *Proceedings of International Conference on Power Systems Transients, IPST*, pp. 20–24, 1999.