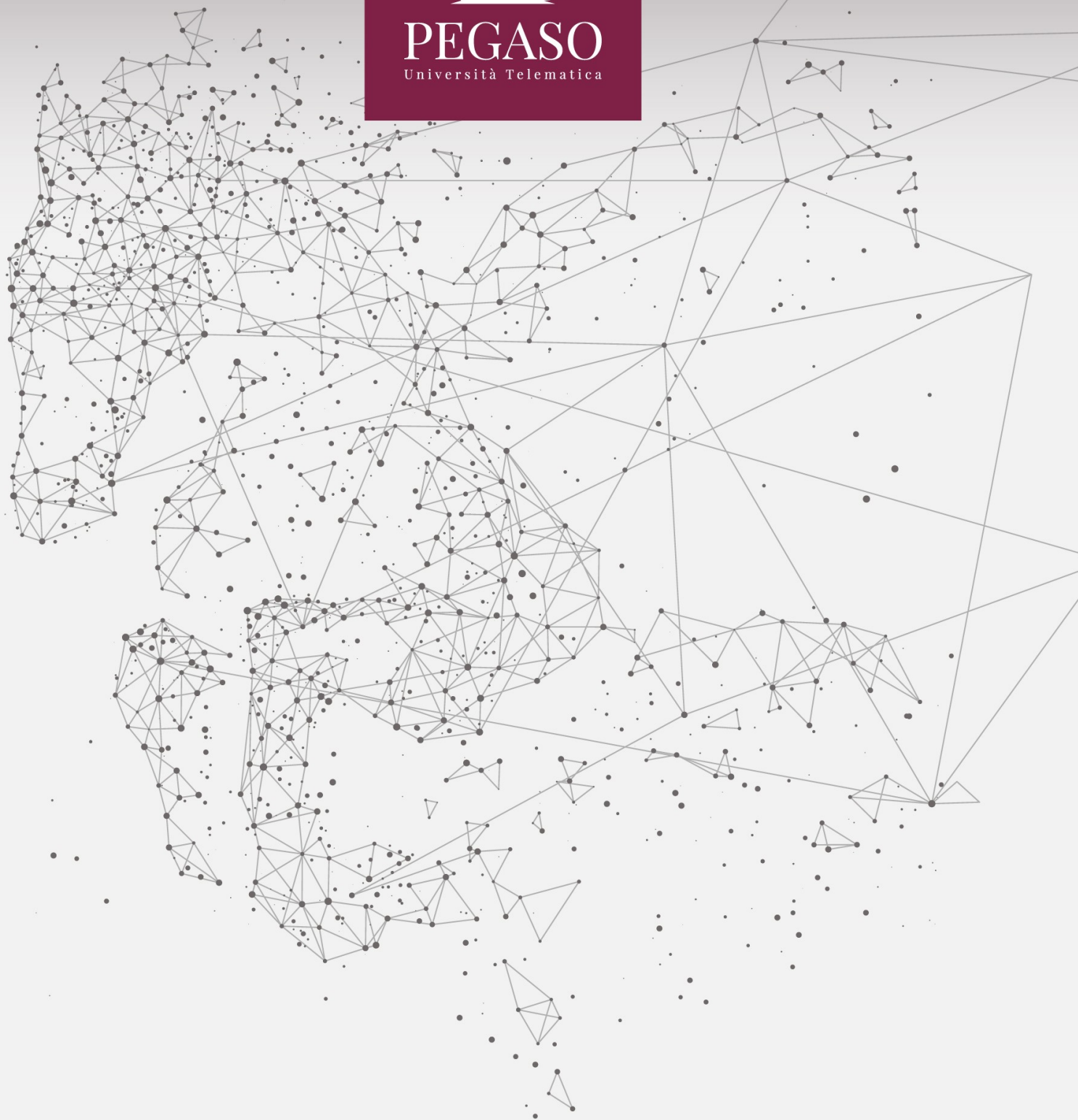




**PEGASO**  
Università Telematica





# Indice

1. PREMESSA .....	3
2. INTRODUZIONE E CONCETTI GENERALI .....	4
3. OBIETTIVI DEL TESTING WHITE BOX .....	5
4. PUNTI DI FORZA DEL TESTING WHITE BOX .....	6
5. LIMITI DEL TESTING WHITE BOX.....	7
6. CRITERI DI COPERTURA.....	8
7. MUTUATION TESTING.....	13
8. GENERAZIONE AUTOMATICA DI CASI DI TEST .....	15
9. CONCLUSIONI E SINTESI .....	16
BIBLIOGRAFIA .....	17

## 1. Premessa

Il testing white box rappresenta una delle tecniche fondamentali nel panorama del collaudo del software. Si tratta di un approccio che si basa sulla **conoscenza dettagliata della struttura interna del codice**, contrariamente a quanto accade nel testing black box, dove il focus si concentra esclusivamente sul comportamento esterno del sistema. Nel contesto del white box testing, l'obiettivo è quello di analizzare **percorsi logici, condizioni decisionali e flussi di controllo** interni, con lo scopo di garantire un comportamento conforme alle aspettative progettuali. Questo approccio consente una verifica più profonda, permettendo di rilevare errori latenti e di assicurare un livello elevato di affidabilità e qualità del software. Tecniche come i **criteri di copertura**, il **mutation testing** e l'**automazione della generazione dei test case** rivestono un ruolo centrale nella costruzione di una suite di test robusta e significativa.

La natura strutturale del white box testing lo rende particolarmente indicato per il controllo di porzioni critiche del sistema, come algoritmi complessi, moduli di sicurezza o componenti soggetti a frequenti modifiche. In tali contesti, la possibilità di esplorare in modo esaustivo i cammini esecutivi consente di individuare condizioni anomale o comportamenti non intenzionali, spesso invisibili attraverso tecniche più superficiali.

Inoltre, l'integrazione con strumenti moderni consente di aumentare l'efficacia del white box testing: ambienti di sviluppo integrato (IDE) dotati di analisi statica e dinamica, profiler di esecuzione e strumenti di misura della copertura forniscono un ecosistema che potenzia la capacità di esplorazione e verifica. In tale quadro, il white box testing si configura come uno strumento indispensabile nelle prime fasi del ciclo di vita del software, contribuendo in modo decisivo alla sua solidità e manutenibilità, nonché alla riduzione dei costi di manutenzione nel lungo periodo.

## 2. Introduzione e Concetti Generali

Il white box testing, conosciuto anche con i termini di **structural testing** o **glass box testing**, si basa sull'idea che, per verificare efficacemente un programma, sia necessario comprendere la sua struttura interna. In particolare, questa tecnica consente di testare la logica del programma esaminando i **percorsi di esecuzione**, le **condizioni logiche** e le **strutture di controllo** implementate nel codice. Attraverso questo approccio, si ottiene una visibilità completa del comportamento del software, consentendo una verifica dettagliata che va oltre il semplice confronto tra input e output.

Questo tipo di test si differenzia radicalmente dal black box testing, il quale si concentra sull'input-output del sistema ignorando completamente l'implementazione interna. Tale distinzione non è solo teorica, ma incide profondamente sulla strategia di test adottata: mentre il black box si limita a osservare i sintomi, il white box può indagare le cause. Il white box testing, infatti, si propone di garantire che ogni **componente interna del software** operi correttamente, rendendo possibile l'individuazione di **errori logici**, **variabili non inizializzate**, **loop infiniti** e **condizioni non raggiungibili**.

Inoltre, il white box testing promuove una **maggiore trasparenza nel processo di sviluppo**, poiché ogni aspetto del codice viene esaminato alla luce del comportamento atteso. Questo tipo di analisi, essendo basata su una visione completa della struttura interna, permette anche di confrontare le implementazioni con gli standard di codifica e le pratiche ingegneristiche consolidate. La capacità di identificare **incoerenze**, **anomalie** e **violazioni di stile** costituisce un ulteriore valore aggiunto, soprattutto in ambienti professionali dove la qualità del software è strettamente monitorata.

Un aspetto di rilievo è la capacità di questo approccio di stimolare una programmazione più disciplinata: sapendo che ogni riga sarà potenzialmente sottoposta a verifica, gli sviluppatori sono incoraggiati a scrivere codice più leggibile, modulare e mantenibile. Ciò agevola la **collaborazione tra membri del team**, specialmente nei contesti di sviluppo agile o distribuito, dove la comprensibilità del codice è cruciale per la continuità del lavoro. In tal senso, si dimostra cruciale per garantire **alta copertura del codice**, facilitare la manutenzione, migliorare la comprensione del comportamento del sistema e supportare attività successive come il refactoring, l'ottimizzazione e l'estensione delle funzionalità.

### 3. Obiettivi del Testing White Box

Gli obiettivi principali del white box testing si focalizzano sull'**analisi approfondita della logica interna** del codice. In primo luogo, si cerca di verificare che ogni **condizione, ciclo e struttura decisionale** si comporti secondo quanto previsto, attraverso una rigorosa esplorazione dei rami logici e dei possibili flussi di esecuzione. Questo approccio consente di identificare con precisione **errori strutturali e logici**, come condizioni di race, deadlock, uso scorretto di variabili locali o globali e percorsi esecutivi non previsti, che potrebbero sfuggire ad altre forme di testing più superficiali o orientate al comportamento esterno.

Inoltre, una delle finalità cruciali è la **massimizzazione della copertura del codice**, ossia l'assicurazione che ogni **istruzione, ramo o condizione** venga eseguita almeno una volta durante l'esecuzione dei test. Questo obiettivo è particolarmente importante per garantire un'adeguata affidabilità del sistema, poiché assicura che nessuna parte del codice rimanga potenzialmente inesplorata o non verificata. A tal fine, vengono utilizzate metriche di copertura come la **statement coverage**, la **branch coverage** e la **path coverage**, che forniscono un'indicazione oggettiva della qualità e dell'estensione dei test.

Un ulteriore obiettivo riguarda il **supporto alla manutenzione**, poiché una buona copertura e una profonda comprensione del codice facilitano eventuali modifiche future, riducendo il rischio di introdurre nuovi errori. La disponibilità di test ben strutturati funge da rete di sicurezza, permettendo di rilevare tempestivamente eventuali regressioni o impatti inattesi. In tal senso, il white box testing non solo migliora la qualità del codice, ma diventa un fattore abilitante per pratiche di sviluppo moderno come l'integrazione continua, il refactoring incrementale e la gestione del debito tecnico.

#### Prerequisiti per il testing white box

Per essere eseguito in modo efficace, il white box testing richiede una serie di **condizioni preliminari** e **competenze tecniche** specifiche. Tra i prerequisiti fondamentali vi è l'**accesso completo al codice sorgente**, senza il quale risulta impossibile analizzare i percorsi logici o applicare criteri di copertura. Inoltre, è essenziale una **conoscenza approfondita del linguaggio di programmazione** utilizzato, nonché la capacità di **leggere e interpretare la logica implementata**. Devono essere disponibili anche strumenti di supporto quali **IDE avanzati, profiler, tool per la misurazione della copertura** (come JaCoCo o gcov) e **ambienti per il testing automatizzato**. La **documentazione tecnica aggiornata** rappresenta infine un elemento cruciale, poiché permette di comprendere le intenzioni progettuali alla base del codice, facilitando la redazione e l'esecuzione di casi di test significativi.

## 4. Punti di Forza del Testing White Box

Il white box testing offre numerosi vantaggi che lo rendono un alleato strategico nella fase di sviluppo software. Uno dei principali punti di forza è l'**elevata precisione** nella verifica, poiché consente di esplorare a fondo i **percorsi logici** e le **condizioni interne** del programma. Tale accuratezza permette non solo di individuare i punti critici del codice, ma anche di comprendere meglio la relazione tra struttura e comportamento del software.

Inoltre, permette l'**individuazione precoce di errori**, aumentando la probabilità di correggere difetti prima che essi abbiano impatti critici sul funzionamento globale del sistema. L'identificazione anticipata di anomalie consente una riduzione significativa dei costi di correzione, specialmente se confrontata con le spese necessarie a rimediare a bug scoperti in fase avanzata di sviluppo o, peggio ancora, in produzione. La visibilità profonda offerta dal white box testing favorisce anche la rilevazione di condizioni potenzialmente pericolose, come l'utilizzo improprio della memoria, i loop infiniti e le variabili non inizializzate.

Il white box testing fornisce anche **metriche oggettive**, misurando ad esempio la percentuale di codice coperta dai test, la densità dei rami esercitati e la varietà dei percorsi esplorati. Queste metriche permettono ai team di sviluppo di monitorare in modo rigoroso l'avanzamento della qualità e di identificare rapidamente aree problematiche. In contesti dove la tracciabilità e la conformità agli standard sono richieste, come nei settori medicale, automotive o aerospaziale, tali misurazioni assumono un'importanza cruciale.

Infine, il white box testing risulta perfettamente integrabile nei **processi automatizzati** come le pipeline di integrazione continua e distribuzione continua (CI/CD), garantendo una verifica tempestiva e continua ad ogni modifica del codice. Questo lo rende particolarmente adatto al **testing unitario**, dove è essenziale intervenire in modo puntuale e tempestivo su porzioni di codice limitate ma cruciali. La combinazione di automazione, precisione e profondità rende il white box testing un componente chiave nella strategia di qualità del software moderno.

## 5. Limiti del Testing White Box

Nonostante i suoi vantaggi, il white box testing presenta anche alcuni **limiti significativi**. In primo luogo, essendo **strettamente dipendente dall'implementazione**, qualsiasi modifica al codice può invalidare i test esistenti, rendendo necessaria una costante manutenzione. Questa caratteristica comporta una fragilità strutturale del sistema di testing: anche modifiche minime al codice, come una rifattorizzazione interna o un cambiamento nei nomi delle variabili, possono richiedere una revisione estesa dei test esistenti, aumentando così i costi indiretti della manutenzione.

Inoltre, i **costi associati** a questa tecnica sono elevati, sia in termini di tempo che di risorse umane, poiché richiede sviluppatori esperti e strumenti avanzati. Il personale coinvolto deve possedere competenze specialistiche, che includano non solo una padronanza del linguaggio di programmazione, ma anche una conoscenza approfondita delle tecniche di testing, delle metriche di copertura e degli strumenti di automazione. Questi requisiti limitano l'accessibilità del white box testing a team dotati di adeguate risorse tecniche e organizzative.

Un altro svantaggio è la **copertura parziale dei requisiti**, poiché il white box testing non è in grado di rilevare errori legati ai requisiti funzionali o all'interfaccia utente. Esso opera infatti su un piano esclusivamente strutturale, trascurando gli aspetti legati all'esperienza utente, alla validazione delle specifiche o al rispetto delle aspettative di business. Questo implica che, anche in presenza di una copertura completa a livello di codice, il software potrebbe comunque non soddisfare le esigenze finali se non supportato da altri tipi di test.

Pertanto, se utilizzato come unica strategia di testing, rischia di lasciare scoperti aspetti importanti del comportamento del software. Per tale motivo, viene spesso affiancato da tecniche di black box o di tipo ibrido, al fine di garantire una verifica più completa. L'integrazione di metodi diversi consente di colmare le lacune specifiche di ciascun approccio, realizzando una strategia di testing più solida, efficace e resiliente agli imprevisti dello sviluppo reale.

## 6. Criteri di Copertura

Nel contesto del white box testing, i **criteri di copertura** costituiscono strumenti fondamentali per misurare l'estensione e l'efficacia dell'attività di test. Tali criteri forniscono indicazioni quantitative sulla porzione di codice effettivamente esercitata durante l'esecuzione dei test, rappresentando così un indicatore chiave della qualità della verifica strutturale. La definizione e l'applicazione sistematica dei criteri di copertura permettono non solo di identificare aree non testate del codice, ma anche di progettare casi di test mirati, migliorare la robustezza del software e favorire un refactoring sicuro.

L'impiego di criteri di copertura riveste un ruolo cruciale nei contesti ad alta criticità, come nel settore medicale, aerospaziale o finanziario, dove la certezza di avere analizzato tutte le possibili condizioni e ramificazioni può determinare la sicurezza e l'affidabilità dell'intero sistema. Inoltre, la copertura consente di documentare in maniera rigorosa il processo di verifica, facilitando il rispetto di normative e standard internazionali (come ISO 26262, DO-178C, IEC 62304) che richiedono evidenze oggettive della qualità del software.

I principali **obiettivi** associati all'uso dei criteri di copertura sono:

- Guidare la progettazione di test strutturati ed efficaci;
- Valutare la completezza dell'analisi effettuata;
- Rilevare codice morto o inaccessibile;
- Sostenere la qualità del codice durante l'intero ciclo di sviluppo.

Tra i criteri più comuni si trovano:

- **Copertura delle istruzioni (statement coverage)**
- **Copertura dei rami (branch coverage)**
- **Copertura delle condizioni (condition coverage)**
- **Copertura delle condizioni multiple (multiple condition coverage)**
- **Copertura del percorso (path coverage)**

Ogni criterio offre un livello crescente di precisione e dettaglio, sebbene a costi computazionali e organizzativi sempre maggiori. Per esempio, mentre la statement coverage richiede un numero relativamente contenuto di test case, la path coverage comporta l'analisi di tutte le combinazioni possibili di esecuzione, con un'esplosione esponenziale della complessità. La scelta del criterio da adottare dipende da molteplici fattori, tra cui la criticità del codice, il livello di test (unitario, di integrazione, di sistema), le risorse disponibili e gli obiettivi del progetto. In generale, una strategia efficace prevede un approccio

progressivo e modulare, che inizia con i criteri più semplici per poi estendersi, se necessario, a quelli più complessi nelle parti sensibili del sistema.

### Statement Coverage

La **statement coverage**, o copertura delle istruzioni, rappresenta il criterio più basilare e intuitivo tra quelli adottabili. Essa verifica che ogni **singola istruzione** del codice sia stata eseguita almeno una volta nel corso dei test. Questo approccio è spesso utilizzato come punto di partenza nella misurazione della copertura, poiché è relativamente semplice da implementare e consente di ottenere risultati immediati.

Tra i **vantaggi** principali si annoverano:

- Facilità di implementazione tramite strumenti automatizzati.
- Fornitura di un primo livello di confidenza sul comportamento del codice.

Tuttavia, presenta anche **limiti significativi**: la statement coverage non garantisce che tutte le condizioni logiche siano state adeguatamente testate. Infatti, è possibile coprire ogni istruzione senza esplorare tutte le ramificazioni logiche che portano a tale esecuzione.

Pertanto, la statement coverage fornisce un'indicazione iniziale utile, ma non sufficiente per una verifica esaustiva dei flussi di controllo complessi.

### Branch Coverage

La **branch coverage**, o copertura dei rami, costituisce un'evoluzione rispetto alla statement coverage, fornendo un livello di verifica più approfondito. Questo criterio richiede che ogni **ramo di una struttura decisionale** (come if, switch, while, for, case, ecc.) venga eseguito almeno una volta. In altre parole, ciascuna **condizione booleana** deve essere verificata sia nel caso in cui risulti vera, sia nel caso in cui risulti falsa.

Uno dei principali **vantaggi** di questa tecnica è la maggiore capacità di rilevare **errori logici** che potrebbero non emergere con una copertura limitata alle istruzioni. Per esempio, condizioni che risultano sempre vere o sempre false non vengono intercettate dalla statement coverage, ma possono essere individuate tramite la branch coverage.

La branch coverage è spesso considerata un **compromesso efficace** tra complessità e beneficio ottenuto, soprattutto nei test di unità e nei moduli ad alta coesione. Essa garantisce una visione più completa del comportamento condizionale del codice, senza richiedere l'esplorazione di tutte le possibili combinazioni di condizioni (come nel caso della path coverage).

Tra i **limiti** va comunque considerata la possibile presenza di condizioni complesse che combinano più espressioni logiche. In tali casi, la branch coverage potrebbe non essere sufficiente per esplorare a fondo ogni singolo operatore logico, ed è necessario integrarla con tecniche più raffinate, come la **condition coverage** o la **multiple condition coverage**.

Nel complesso, la branch coverage rappresenta uno strumento essenziale per ottenere una copertura efficace senza sovraccaricare eccessivamente il processo di testing, e viene ampiamente adottata come metrica di riferimento nei contesti industriali.

### Condition Coverage

La **condition coverage**, o copertura delle condizioni, rappresenta un ulteriore affinamento della branch coverage. Essa richiede che ogni **condizione atomica** presente all'interno di un'espressione booleana sia valutata almeno una volta come **vera** e almeno una volta come **falsa**. Questo criterio consente di verificare in modo dettagliato il comportamento delle singole parti di un'espressione logica complessa.

Uno dei principali **vantaggi** di questa tecnica è la capacità di identificare condizioni ridondanti o condizioni che non influenzano mai il risultato finale. Tale situazione può emergere quando, all'interno di un'espressione congiuntiva o disgiuntiva, una delle condizioni è sempre vera o sempre falsa indipendentemente dagli altri fattori. La condition coverage, pertanto, mira a **esercitare separatamente ciascun elemento** dell'espressione logica.

Tra i **limiti** principali vi è il fatto che, sebbene ogni condizione venga testata nei suoi due stati, non si garantisce che **tutte le combinazioni possibili** delle condizioni siano state esplorate. Inoltre, la condition coverage non considera necessariamente l'effetto combinato delle condizioni sul comportamento dell'intero blocco decisionale, motivo per cui, in contesti particolarmente critici, si ricorre alla **multiple condition coverage**.

In conclusione, la condition coverage si configura come uno strumento intermedio che, rispetto alla branch coverage, offre maggiore profondità analitica, mantenendo tuttavia una complessità gestibile nella maggior parte dei progetti.

### Multiple Condition Coverage

La **multiple condition coverage**, o copertura delle condizioni multiple, rappresenta uno dei criteri più completi e rigorosi nel panorama del white box testing. Essa impone che vengano esercitate **tutte le combinazioni possibili** di verità delle condizioni presenti in un'espressione logica. In altre parole, se una decisione contiene  $n$  condizioni atomiche, sarà necessario generare test che coprano  **$2^n$  combinazioni**, esplorando in modo esaustivo l'interazione tra le condizioni.

Questo approccio garantisce la **massima precisione nella verifica** del comportamento decisionale del codice, rendendolo particolarmente utile nei contesti critici, come i sistemi embedded per la sicurezza, l'avionica o i dispositivi medici. Tuttavia, proprio per la sua completezza, la multiple condition coverage comporta un **costo computazionale e organizzativo elevato**, in quanto la crescita esponenziale del numero di test può diventare rapidamente ingestibile.

Il **principale vantaggio** di questa tecnica è la capacità di identificare errori sottili che derivano da interazioni specifiche tra condizioni, come precedenze logiche mal gestite o dipendenze implicite tra i valori. Inoltre, consente di rilevare **dipendenze logiche non documentate**, che possono compromettere la leggibilità e la manutenibilità del codice.

D'altro canto, tra i **limiti** più significativi si annovera la **scalabilità**: al crescere del numero di condizioni, la mole di test necessari può diventare proibitiva. Per questo motivo, la multiple condition coverage viene applicata generalmente in modo selettivo, concentrandosi su porzioni di codice ad alta criticità o su funzioni particolarmente complesse.

In sintesi, la multiple condition coverage costituisce una tecnica di verifica di altissimo valore, da impiegare con giudizio e in contesti nei quali il costo dell'omissione di una combinazione logica potrebbe essere superiore al costo della sua verifica.

### Path Coverage

La **path coverage**, o copertura dei percorsi, rappresenta uno dei criteri più completi e teoricamente rigorosi nel white box testing. Questo approccio richiede che ogni **percorso di esecuzione possibile** attraverso una funzione, un metodo o un'intera unità di codice venga eseguito almeno una volta. Un percorso, in questo contesto, è definito come una **sequenza unica di istruzioni** che attraversa le varie diramazioni, cicli e condizioni presenti nel flusso di controllo del programma.

Il **grande vantaggio** della path coverage risiede nella sua capacità di **rilevare difetti complessi**, che emergono solo in certe combinazioni di condizioni e iterazioni. Permette infatti di scoprire errori che resterebbero nascosti anche dopo aver applicato altri criteri come branch o condition coverage, poiché valuta l'interazione tra strutture di controllo diverse lungo l'intero flusso di esecuzione.

Tutti i possibili cammini devono essere esplorati per soddisfare la path coverage. Tuttavia, uno dei **principali limiti** di questo criterio è la **scalabilità**: con l'aumento della complessità del codice (in particolare cicli e condizioni annidate), il numero di percorsi cresce **esponenzialmente**, rendendo spesso impossibile testare ogni cammino in modo esaustivo.

Per ovviare a questo problema, si utilizzano strategie più sostenibili, come:

- **Basis path testing**: focalizzato su percorsi linearmente indipendenti.
- **Loop testing**: verifica del comportamento dei cicli per 0, 1 e N iterazioni.

Nonostante le difficoltà operative, la path coverage è considerata uno strumento fondamentale per il testing ad alta affidabilità, in quanto fornisce una garanzia teorica di esaurimento del comportamento eseguibile del software. In ambienti mission-critical o safety-critical, rappresenta uno standard di riferimento.

Pertanto, la path coverage va impiegata con attenzione e supportata da strumenti di analisi automatica e tecniche di selezione ottimizzata dei test case, così da mantenere il rapporto costo-beneficio entro limiti gestibili.

### Confronto tra criteri di copertura e scelta del più adatto

Nel contesto del white box testing, la scelta del criterio di copertura più adatto rappresenta un momento cruciale nella definizione della strategia di verifica. Ogni criterio — dalla statement coverage alla path coverage — offre un **grado crescente di profondità e completezza**, ma anche un **aumento proporzionale della complessità e dei costi associati**.

La **scelta del criterio più adeguato** dipende da numerosi fattori:

- **Livello di testing** (unitario, integrazione, sistema).
- **Criticità del componente software** (es. gestione della sicurezza, affidabilità richiesta).
- **Budget e tempo disponibili**.
- **Disponibilità di strumenti di supporto e automazione**.

Una **buona prassi** consiste nell'adottare un approccio modulare e progressivo:

1. Applicare sistematicamente la **branch coverage** come baseline.
2. Integrare con **condition coverage** nei blocchi decisionali complessi.
3. Riservare **multiple condition coverage** e **path coverage** a sezioni ad alta criticità o a logiche particolarmente delicate.

Infine, è essenziale ricordare che l'efficacia del testing non deriva dalla sola scelta del criterio, ma dalla **coerenza con cui esso viene applicato**, dalla **chiarezza nella documentazione dei risultati**, e dalla **capacità di adattamento alle esigenze reali del progetto**. Il criterio migliore, pertanto, non è quello più sofisticato in astratto, ma quello più efficace in relazione al contesto specifico in cui viene impiegato.

## 7. Mutation Testing

Il **mutation testing** rappresenta una tecnica avanzata di valutazione dell'efficacia dei test esistenti, ed è strettamente connesso all'approccio white box. L'idea alla base è semplice quanto potente: introdurre modifiche controllate al codice sorgente, dette **mutazioni**, e verificare se la suite di test in uso è in grado di **individuare e segnalare tali alterazioni**.

Una mutazione consiste in una **variazione artificiale del codice**, ottenuta ad esempio sostituendo un operatore aritmetico (+ con -), alterando una condizione (== con !=), o modificando il valore restituito da una funzione. Il codice così modificato è detto **mutante**, e se l'insieme di test fallisce su questo codice, si dice che il mutante è stato **ucciso**.

L'obiettivo del mutation testing è duplice:

1. **Misurare la qualità della suite di test:** una batteria di test efficace dovrebbe essere in grado di rilevare tutte (o quasi) le mutazioni introdotte.
2. **Individuare lacune nella copertura semantica:** anche test che soddisfano alti livelli di copertura strutturale (es. 100% branch coverage) possono non essere sufficienti a rilevare errori logici o anomalie funzionali sottili.

Tra i **vantaggi** principali del mutation testing troviamo:

- Capacità di valutare l'adeguatezza logica dei test, non solo la loro copertura
- Identificazione di test ridondanti o inutili
- Stimolo alla creazione di casi di test più significativi e discriminanti

Tuttavia, esistono anche **limiti** importanti:

- **Elevato costo computazionale:** per ogni mutante generato, è necessario rieseguire l'intera suite di test.
- **Gestione dei mutanti equivalenti:** alcune mutazioni non modificano il comportamento del programma, rendendo impossibile la loro individuazione automatica.
- **Complessità di analisi dei risultati**, soprattutto in progetti di grandi dimensioni.

Per mitigare tali problematiche, i tool moderni di mutation testing (come **Pitest** per Java o **MutPy** per Python) implementano tecniche di filtraggio dei mutanti equivalenti, selezione intelligente delle mutazioni e parallelizzazione dei test.

Il mutation testing si rivela particolarmente utile in fase di **validazione della suite di test** e nella verifica della **robustezza del codice** in presenza di modifiche. Il suo utilizzo è raccomandato in progetti dove

la qualità del software riveste un'importanza strategica e si dispone delle risorse necessarie per gestirne l'elevata intensità computazionale.

## 8. Generazione automatica di casi di test

La **generazione automatica di casi di test** rappresenta una delle frontiere più evolute del testing moderno, in particolare nell'ambito del white box testing. In scenari caratterizzati da **complessità crescente, tempi di sviluppo serrati** e frequenti modifiche al codice, l'automazione assume un ruolo cruciale per garantire copertura adeguata, qualità costante e reattività nei cicli di rilascio.

Tra le principali **motivazioni** che spingono all'adozione di tecniche automatiche troviamo:

- La difficoltà di progettare manualmente test completi ed efficaci, specie in sistemi complessi.
- La necessità di mantenere aggiornata la suite di test in presenza di frequenti evoluzioni del software.
- Il desiderio di aumentare la copertura (strutturale, funzionale, di sicurezza) in tempi ridotti.
- Il supporto all'integrazione continua e al test regressivo automatizzato.

L'obiettivo della generazione automatica è duplice: da un lato **produrre casi di test significativi**, in grado di rilevare difetti reali; dall'altro **ridurre l'intervento umano**, aumentando efficienza e affidabilità. Tuttavia, non si tratta di un processo completamente autonomo: per ottenere risultati utili è necessario **configurare, adattare e validare** gli strumenti impiegati.

La generazione automatica si fonda su diverse **tecniche e approcci**, ciascuno con specifici punti di forza:

- Tecniche basate su **specifiche**: partono da modelli formali, requisiti o diagrammi UML per generare test coerenti con la descrizione del comportamento atteso.
- Tecniche **white-box**: analizzano il codice sorgente per creare test orientati alla copertura (statement, branch, path).
- Approcci **casuali e fuzzing**: generano input casuali o semi-casuali per scoprire crash, errori di validazione o vulnerabilità.
- Tecniche di **machine learning** o test mining: estraggono casi di test da esempi d'uso reali o log di esecuzione.

In molti ambienti si adottano **strategie ibride**, che combinano più metodi per massimizzare la copertura e l'efficacia del processo. La generazione automatica non sostituisce il testing tradizionale, ma lo potenzia, migliorandone la portata, la frequenza e l'oggettività.

Nel prossimo modulo saranno analizzati nel dettaglio i principali tipi e strumenti di generazione automatica, con esempi e casi d'uso specifici.

## 9. Conclusioni e sintesi

Il testing white box si configura come una tecnica di verifica **indispensabile per garantire l'affidabilità e la qualità del software**, soprattutto nelle prime fasi dello sviluppo. A differenza di approcci orientati al comportamento esterno (black box), consente una **valutazione approfondita della struttura interna del codice**, rendendo possibile l'identificazione di errori logici, percorsi non raggiungibili, e condizioni potenzialmente critiche prima che possano manifestarsi in fase operativa.

Nel corso di questa trattazione sono stati analizzati i principali **criteri di copertura** (statement, branch, condition, path e multiple condition coverage), ciascuno con il proprio equilibrio tra **profondità analitica e sostenibilità operativa**. È emersa con chiarezza l'importanza di selezionare il criterio più adatto al contesto specifico, bilanciando l'esigenza di accuratezza con i vincoli di tempo, risorse e criticità funzionale.

Sono state inoltre esplorate le potenzialità della **generazione automatica dei test**, che oggi rappresenta un'opportunità concreta per migliorare efficienza e copertura, nonché per supportare pratiche di sviluppo moderno come il **Continuous Integration**. L'integrazione di metodi automatici (white-box, basati su specifiche, fuzzing, machine learning) consente di affrontare in modo sistematico la complessità crescente del software contemporaneo.

Infine, l'introduzione al **mutation testing** ha permesso di evidenziare come la valutazione della suite di test non possa limitarsi a misure quantitative (copertura del codice), ma debba includere una riflessione sulla **capacità dei test di rilevare realmente comportamenti anomali**. Il mutation testing si propone infatti come un valido strumento per misurare la **robustezza semantica** dei test, promuovendo la creazione di casi di verifica più efficaci e pertinenti.

In sintesi, il testing white box non deve essere considerato come un'attività isolata, ma come parte integrante di un approccio sistemico alla qualità del software. La sua efficacia dipende dalla **scelta consapevole delle tecniche**, dalla **disponibilità di strumenti adeguati** e da una **cultura progettuale orientata al miglioramento continuo**.

“Il testing white box è uno strumento potente nelle mani degli sviluppatori: consente di esplorare il codice in profondità, rilevare errori critici e aumentare la qualità del software sin dalle prime fasi del ciclo di sviluppo.”

## **Bibliografia**

- Bruegge, B., & Dutoit, A. H. (2010). Object-oriented software engineering. Using UML.