

LA TERMOGRAFIA NELLE APPLICAZIONI ENERGETICHE

(AVIS – Advanced Vision Inspection System)

Anastasio Claudio

Industry Department, Auxilium Tech srl, Via Brenta 13, Roma, 00198, Italia

SOMMARIO

1.0 INTRODUZIONE

1.1 Obiettivo

1.2 Standard

1.3 Esigenze del progetto

1.4 Aspetti tecnici

2.0 FASI PROGETTUALI

2.1 Elaborazioni risultati attesi

3.0 ANALISI AFFIDABILISTICA E PROGETTUALE

4.0 CONCLUSIONI

1.0 INTRODUZIONE

Il presente documento intende presentare una proposta di soluzione alle esigenze di monitoraggio predittivo e di sicurezza degli impianti IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle).

Punto focale degli impianti di produzione è il “Service Factor” di esercizio, al quale contribuiscono diversi fattori, in particolare le fermate obbligate per carenza diagnostica.

Questa condizione è tanto più rilevante quanto più onerose sono le perdite economico-produttive derivate.

Gli impianti di IGCC sono tra i più sensibili agli aspetti di ottimizzazione e affidabilità del “Service Factor”.

La manutenzione preventiva è “conditio sine qua non” per aumentare l’indice di “Service Factor” attraverso i controlli non distruttivi, con lo scopo di evitare fermate di impianto non programmate.

L’evoluzione tecnologica nei controlli termografici unitamente alle tecnologie di “Artificial Vision and Image Recognition” sono state il punto di partenza della progettazione del sistema AVIS, che rappresenta nello scenario mondiale la prima e tuttora unica applicazione installata negli impianti produttivi energetici del Gruppo api e del Gruppo ERG.

1.1 Obiettivo

Obiettivo del sistema è restituire in maniera puntuale e continua le temperature superficiali del mantello gassificatori senza contatto (termografia), compensate per valori ambientali di contesto (velocità e direzione del vento, irraggiamento solare, temperatura ambiente, ecc...) diminuendo le cause di fermata stocastiche.

Tale obiettivo, che si definisce strategico, genera dei benefici secondari in ambito di sicurezza e ambiente.

Un monitoraggio continuo di tutte le temperature di superficie aumenta la sicurezza operativa nelle operazioni di manovra e di manutenzione. La diminuzione delle fermate di impianto diminuisce l’emissione di sostanze dannose all’atmosfera dovute al warm-map di avvio o all’avviamento di impianti secondari di produzione a maggiore impatto ambientale.

1.2 Standard

L’adozione di standard industriali consolidati, nei materiali e nella certificazione del sistema per zone pericolose classificate con pericolo di esplosione in atmosfera, hanno consentito implementazioni omogenee di strumenti di controllo ed interfacciamento con l’infrastruttura di controllo del processo senza necessità di skill proprietari.

La soluzione adottata è frutto di un lungo e articolato percorso di ingegneria del sistema che ha consentito l’utilizzo di tecnologie indipendenti dal vendor, con il beneficio per il Cliente di una completa acquisizione del patrimonio tecnologico.

1.3 Esigenze del progetto

La progettazione è stata operata su un sistema aperto, interamente basato su tecnologie e prodotti standard del mercato, garantendo al Cliente la disponibilità di un sistema completamente indipendente dal fornitore, sia per le operazioni di manutenzione che per gli assestamenti e upgrade futuri.

L’adozione di standard internazionali nella metodologia applicativa di realizzazione, e quindi anche documentale e relazionale, nello sviluppo hardware, software e firmware del sistema, sono garanzie di portabilità del sistema, scalabilità e flessibilità.

L’utilizzo di criteri e tecnologie non distruttive, con emissioni non dannose per l’uomo e per l’ambiente, hanno costituito elementi essenziali nella scelta concettuale, coniugando le esigenze di ispezione automatizzata con i vincoli di salvaguardia ambientale.

1.4 Aspetti tecnici

La maggiore criticità progettuale e tecnologica sulla realizzazione di sistemi termografici per impianti IGCC è data dalla compatibilità tecnica e funzionale dei sensori strumentali termografici con le esigenze di compensazione necessarie per arrivare ad un sistema, nel suo complesso, affidabile e funzionale. Fattori ambientali di contorno quali la velocità e direzione del vento influiscono sensibilmente sulla qualità della misura radiometrica per la presenza, in atmosfera, di particelle tipiche nelle zone costiere (“Texaco’s use of infrared on process gasifier systems as a predictive maintenance tool and the effects of wind on ir survey accuracy” a cura di Albert Amebee Ohliger).

Le caratteristiche termiche minime necessarie per una resa funzionale del sistema sono rappresentate da relazioni che legano l’intensità della radiazione emessa alla temperatura superficiale di un corpo. Un corpo, nel nostro caso il mantello dei gassificatori, è caratterizzato da coefficienti di emissione, assorbimento e trasmissione che indicano la ripartizione dell’energia termica tra i tre fenomeni radiometrici seguenti:

- Infrarosso vicino tra 0,78 e 1,4 μm
- Infrarosso medio tra 1,4 e 3,0 μm
- Infrarosso lontano tra 3,0 e 1.000 μm

Il coefficiente che a noi interessa è l’emissività, definito dall’equazione di Kirchoff e dall’equazione di Stefan Boltzmann.

Da tutte queste relazioni è facile verificare che il problema della misurazione superficiale di un corpo si riduce al calcolo della radiazione emessa e alla conoscenza del coefficiente di emissività. Tale coefficiente, che dipende dal materiale, dallo stato della superficie, dalla temperatura e dalla lunghezza d’onda, è solitamente tabulato per i vari materiali in diverse condizioni e temperature.

Per ottenere risultati migliori spesso i rilevatori termografici prevedono un sistema di correzione che tiene conto del reale coefficiente di emissività misurato direttamente sul corpo in esame.

Dovendo operare una rilevazione termometrica a distanza, bisogna considerare la presenza di un mezzo tra la sorgente e il rilevatore che, nel caso più generale possibile, è l’atmosfera terrestre; i gas presenti nell’aria hanno anch’essi proprietà termiche ed è importante tenerne conto per evitare eccessive attenuazioni della radiazione emessa dal corpo.

In particolare si può evidenziare una variazione dell’assorbimento da parte dell’atmosfera in funzione della lunghezza d’onda della radiazione e la presenza di una finestra a minimo assorbimento corrispondente all’intervallo 7-14 μm .

Il processo di misurazione termografica del mantello gassificatori è influenzato, fondamentalmente, dalla trasmissione termica dei refrattari interni e dal gradiente di umidità relativa dell’aria a contatto della superficie.

Le immagini termografiche devono quindi essere in grado di restituire la mappatura delle zone più fredde a quelle dove, a parità di condizioni di scambio termico, l’influenza ambientale esterna è trascurabile.

L’entità di questo raffreddamento può variare da pochi decimi di grado a oltre dieci gradi, a seconda delle caratteristiche del materiale. Un modello opportuno per il bilancio energetico della superficie può fornire, dalla misura della temperatura, indicazioni quantitative sul processo energetico interno, in dipendenza della temperatura dell’aria, dell’irraggiamento superficiale, dell’umidità relativa ambientale e della ventilazione.

L’applicazione di tale processo di misurazione su grandi superfici richiede una elevata risoluzione spaziale termica.

Una risoluzione spaziale deficitaria o troppo limitata non consentirebbe di poter effettuare valutazioni indirette sul processo termico interno ai gassificatori.

I sensori delle termocamere devono, inoltre, poter sfruttare ogni possibile armonica della radiazione infrarossa LWIR per rendere l'immagine termica più accurata possibile. Perdere le code esterne all'intervallo 8-12 μm è una inutile e ingiustificata perdita di accuratezza, in quanto rende l'intensità termica registrata dalla termocamera meno precisa.

Questo ha maggiore valenza nell'esercizio in continuo outdoor in quanto la termocamera può (e come è evidente accadrà) capitare che ci siano pessime condizioni di visibilità termica (aria molto umida; pioggia; vapori; ecc...) e questa è una condizione che spesso diventa condizione di normale esercizio dell'impianto (vapori nel corso del warm-map; pioggia; miscele di gas in atmosfera; ecc...). In tali condizioni avverse, che rappresentano una condizione di normale esercizio produttivo, un'elevata ricettività alla radiazione fornisce immagini dove uno spettro leggermente più ristretto restituirebbe nero assoluto.

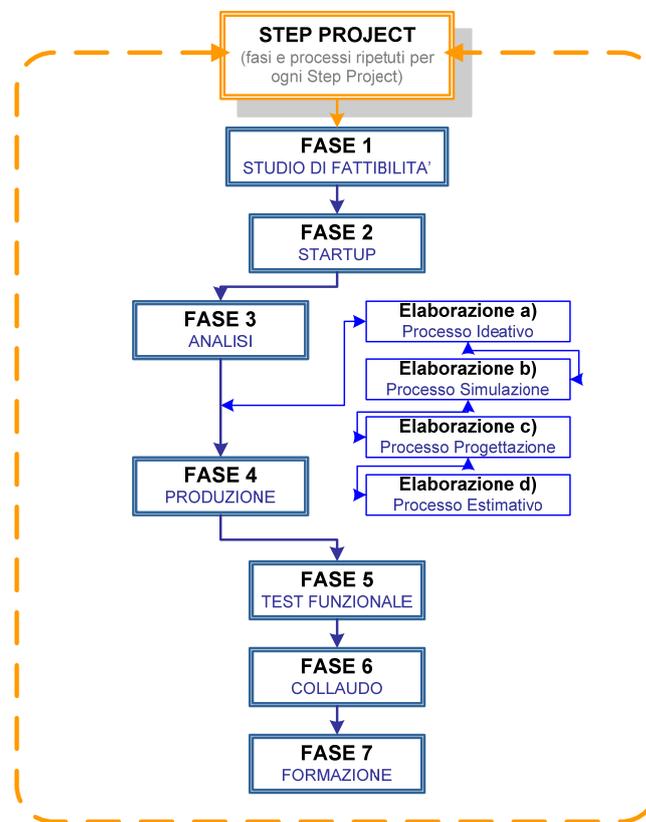
In perfetto accordo con quanto detto sopra, essere in grado di discernere 50 mK invece che 80 mK, significa in sostanza essere in grado di restituire immagini termiche anche quando apparati con sensibilità inferiore restituiscono tutto nero, oppure permettere di discernere variazioni di tono la dove apparati con sensibilità inferiore renderebbero la superficie tutta con lo stesso gradiente termico.

La supponenza che anche 100 mK sarebbero sufficienti ad una ottima risoluzione termografica è tanto vera quanto è limitata la misura nel tempo ed effettuata sempre in condizioni ideali. Tali risoluzioni termiche, superiori ai 50 mK consentiti dall'attuale tecnologia, si rilevano soddisfacenti agli scopi di utilizzo per apparati portatili in attività saltuarie di misurazione, ma si rilevano del tutto insufficienti ed inopportune in applicazioni industriali outdoor in continuo h24 365 giorni anno.

2.0 FASI PROGETTUALI

In questo capitolo vengono espone le metodiche di progettazione, denominate processi, e le fasi operative che caratterizzano la fornitura del sistema in opera, ovvero l'applicazione della modellazione procedurale seguita dalle fasi operative.

Per una visione d'insieme di tutte le attività rappresentiamo graficamente in Figura 1 le sette fasi ed i quattro processi di elaborazione.



FASI PROGETTUALI e PROCESSI

Figura 1 – Fasi progettuali e processi

La modellazione strutturale consente di individuare gli schemi statici che permettono di simulare in modo realistico, il più possibile realistico, il comportamento fisico e reale della struttura.

A tale fine è necessario scegliere un procedimento di analisi che, nel caso specifico, permette di conciliare l'esattezza del risultato con la sicurezza e la praticità operativa e, quindi, con l'economia del procedimento.

2.1 Elaborazione risultati attesi

La progettazione strutturale è, quindi, un processo costituito da varie elaborazioni, in particolare quattro:

a) processo ideativo:

- scelta del materiale
- tipologia
- modalità di costruzione
- modalità di comunicazione

b) processo simulazione:

- modello matematico
- simulazioni eventi
- rapporto

c) processo progettazione:

- disegni di realizzazione
- data sheet
- documentazione costruttiva
- executive summary

d) processo estimativo:

- valutazione dei costi
- distinta attrezzature e componenti

Si rappresenta in Figura 2 le elaborazioni di strutturazione dei processi nel diagramma di flusso logico/analitico.

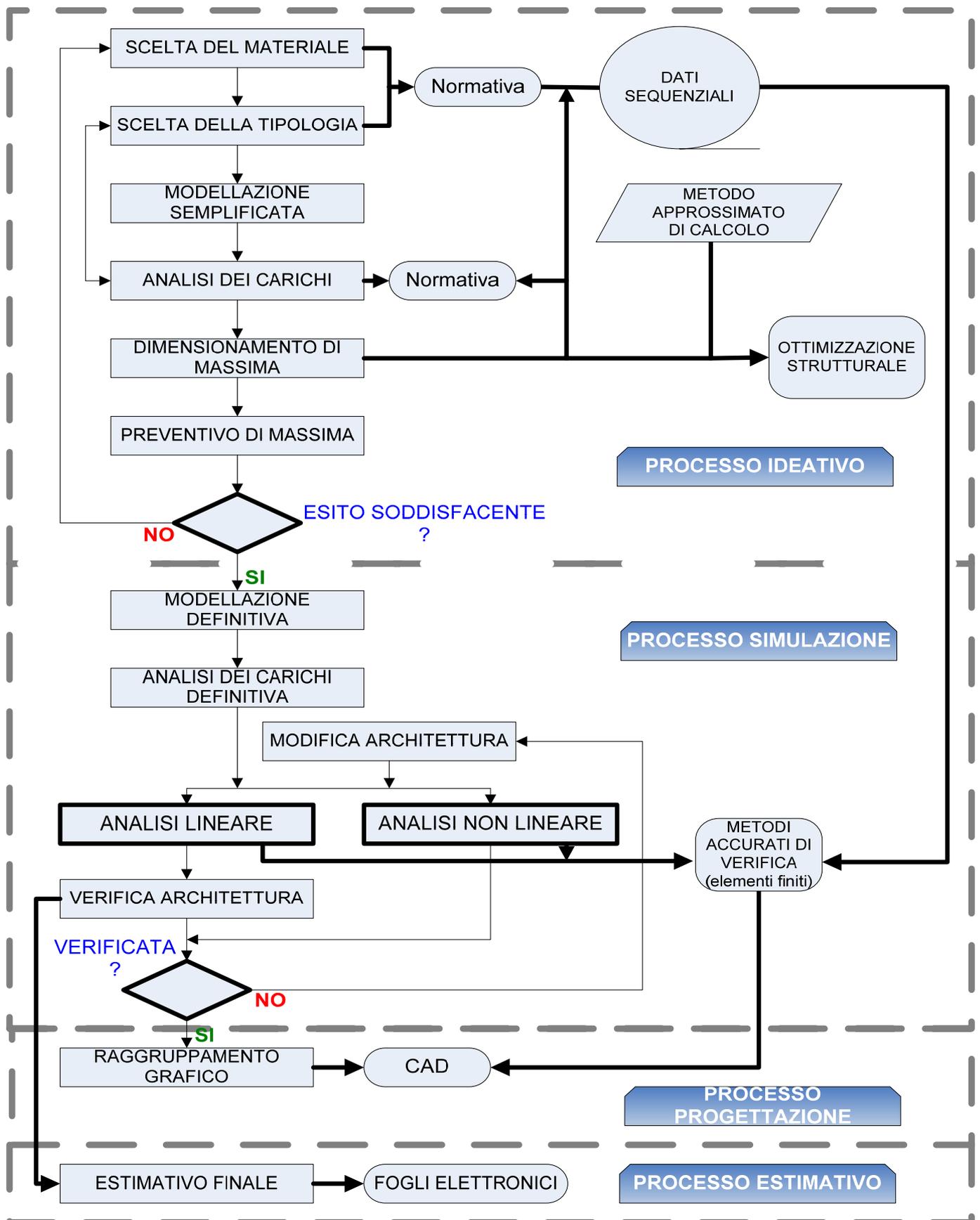


Figura 2 – Strutturazione del processo logico-analitico.

L'analisi strutturale che ne consegue nasce dalla necessità di conoscere il comportamento logico e funzionale del sistema progettato.

Essa si riconduce ad uno dei modelli qui elencati, o ad una loro combinazione:

- ✓ analisi statica o stazionaria
- ✓ analisi di stabilità ("buckling")
- ✓ analisi dinamica (modale, risposta in frequenza, time history, ecc...)
- ✓ analisi lineare
- ✓ analisi non lineare (per materiali, per geometria, per vincoli)

Un importante risultato del progetto è il miglioramento dell'affidabilità, della disponibilità e della manutenzione del sistema.

Attraverso l'approccio RAM (Reliable; Available; Maintainable) si sviluppano le implementazioni di affidabilità su sistemi di controllo industriale.

Si introduce il concetto di affidabilità progettuale e produttiva, evidenziando l'importanza di poter misurare preventivamente l'affidabilità del progetto.

3.0 ANALISI AFFIDABILISTICA E PROGETTUALE

Nello studio di affidabilità progettuale particolare attenzione sarà posta agli aspetti umani che intervengono in tutte le fasi del ciclo di vita di un sistema, dalla fase negoziale fino alla fase di utilizzo, ritenendo questo un aspetto particolarmente innovativo del nostro elaborato.

Tra le varie definizioni di affidabilità (in inglese Reliability) forse la più chiara è la seguente:

"Dicesi affidabilità di un qualsiasi dispositivo (sistema o componente) la probabilità che esso funzioni correttamente, per un dato tempo, in certe condizioni."

Questa definizione contiene alcuni punti importanti:

- Il concetto di affidabilità può essere applicato a qualsiasi oggetto realizzato dall'uomo, sia esso un oggetto semplice (componente), o uno complesso, costituito dall'insieme di più componenti (sistema).
- Nell'aria di nostro interesse consideriamo il sistema di gestione e controllo applicato sul processo di controllo industriale degli impianti IGCC, costituito da un certo numero di devices (termocamere, centraline meteo, plc, ecc...), a loro volta controllati da un computer. In questo caso il sistema è controllato da un certo numero di componenti ottici ed elettromeccanici, più un computer, più un'applicazione software. Un aspetto molto importante nello studio dell'affidabilità è proprio il calcolo dell'affidabilità di un sistema a partire dall'affidabilità dei suoi componenti.

L'affidabilità del sistema dipenderà dall'affidabilità dei singoli componenti (incluso ovviamente il software) e da come essi interagiscono tra di loro. Inoltre l'applicazione software, che fino ad ora abbiamo visto come componente del sistema di controllo, è a sua volta analizzabile come sistema composto da un certo numero di componenti (moduli) software. Anche per l'affidabilità si applica la regola generale di scomposizione gerarchica di un sistema in sotto-insiemi.

- L'affidabilità è una probabilità ed, in quanto tale, è un numero, dimensionale, compreso tra 0 e 1.
- Per poter definire correttamente l'affidabilità di un qualsiasi oggetto (componente o sistema) è fondamentale definire precisamente le condizioni operative e la durata della sua attività. Questi due

termini (condizioni e durata) sono inglobati nel concetto di missione, che risulta essere un concetto basilare nello studio dell'affidabilità.

La definizione sopra può portarci ad un'ulteriore analisi del concetto di affidabilità nel momento in cui cerchiamo di definire con maggiore precisione l'affermazione "funziona correttamente".

E' infatti evidente che non tutti i tipi di malfunzionamento sono ugualmente importanti. Sul sistema termografico si può ipotizzare che se si rompe la stampante probabilmente il guasto non è molto grave (bisognerà certamente ripararla, e questo ha degli impatti sulla manutenzione, ma il guasto non riduce le reali funzionalità del sistema, né crea dei rischi per la sicurezza).

Al contrario, se si guasta il microprocessore del computer (supponendo che non ci siano ridondanze), il nostro sistema è completamente perso!

Pertanto, date le considerazioni fatte sopra, possiamo sostituire la nostra precedente definizione di affidabilità con la seguente:

"Dicesi affidabilità di un qualsiasi dispositivo (sistema o componente) la probabilità che esso non abbia guasti di un certo tipo durante una certa missione."

I vari tipi di affidabilità vengono quindi classificati in base al tipo di guasto che considerano. Una classificazione abbastanza comune è la seguente:

- AFFIDABILITA' LOGISTICA – Probabilità che non capiti alcun guasto (di qualsiasi tipo).
- AFFIDABILITA' DI MISSIONE – Probabilità che non capitino guasti con conseguenze maggiori, tali cioè da pregiudicare la funzionalità del sistema e quindi di impedirgli il completamento della sua missione. Se necessario, si distingue tra guasti significativi (che degradano significativamente la funzionalità del sistema, ma non impediscono il completamento della missione) e guasti maggiori (che invece impediscono il completamento della missione).
- SICUREZZA – Probabilità che non capitino guasti con possibili conseguenze catastrofiche, tali cioè da produrre danni a persone, cose o al sistema stesso.
- AFFIDABILITA' DI UTILIZZO – Probabilità che il sistema funzioni e possa venire usato, in modo sicuro, secondo le esigenze dell'utente, anche e soprattutto in situazioni critiche per l'utente stesso e/o per gli impianti controllati. La probabilità che le funzioni del sistema siano disponibili a svolgere il loro compito quando se ne manifesta necessità, anche dopo lunghi periodi di inutilizzo. (Questa definizione ingloba tutte le categorie affidabilistiche inerenti aspetti umani, di utilizzo, di definizione dei requisiti e delle modalità di utilizzo del sistema, delle competenze necessarie, dell'interazione uomo-macchina, aspetti manageriali, sia di gestione del progetto, sia negoziali e di gestione del contratto).

Molte delle tecniche affidabilistiche sviluppate per il progetto di sistemi hardware non sono direttamente applicabili al software. Questo a causa della sostanziale differenza tra la progettazione software e le altre discipline ingegneristiche. Vediamo in dettaglio queste differenze:

- L'affidabilità tradizionale assume che il progetto sia stato fatto senza errori (o che, in ogni caso, questi errori siano identificati e rimossi prima della messa in esercizio dell'impianto).
- In questo caso, gli unici guasti possibili sono quelli di usura o quelli stocastici, di cui si deve tener conto nell'analisi affidabilistica.

La situazione del software è esattamente speculare: non esistono guasti stocastici o di usura (il software non si deteriora con il tempo), ma esistono sempre errori di disegno. Per capirne il motivo vediamo perché negli altri tipi di progettazione si può ragionevolmente assumere che gli errori di disegno siano stati rimossi e come queste ipotesi non siano valide nel caso del software:

a) Per i progetti non software esiste sempre un approccio sistematico al disegno di sistema, che garantisce l'assenza (o riduce al minimo) degli errori di disegno.

Questo era il caso, ad esempio, dei sistemi elettromeccanici usati per il controllo di processo prima dell'avvento dei microprocessori.

Nel caso delle applicazioni software attuali, il grado di complessità è cresciuto in modo impressionante, causando una crescita non lineare degli errori introdotti nella fase di progettazione. E proprio a causa di tale enorme aumento della complessità che risulta impossibile dimostrare l'assenza di errori di disegno.

Un approccio più rigoroso di questa indimostrabilità di correttezza si trova nei sistemi analogici che sono costruiti con componenti che hanno, all'interno dell'intervallo operativo dell'impianto, un numero infinito di stati stabili, che permettono di descrivere il loro comportamento con funzioni continue e di costruire un modello matematico del sistema. Tale modello può essere studiato analiticamente e le caratteristiche del sistema (nel nostro caso l'affidabilità) possono essere determinate in modo rigoroso. Nel caso di sistemi elettromeccanici digitali, essi sono generalmente costituiti con componenti aventi un insieme finito di stati stabili, ed il sistema risultante ha un numero relativamente piccolo di stati discreti, che può essere studiato e testato in modo esaustivo.

Un'applicazione software, al contrario, è un sistema discreto con un numero estremamente elevato di stati (senza, tra l'altro, alcuna regolarità e ripetitività, quale si trova ad esempio nella componentistica elettronica e nei controlli PLC). Questa complessità fa sì che sia oltremodo difficile analizzare matematicamente un sistema software, come pure testarlo in modo esaustivo.

Il problema della complessità è tale che la maggior parte dei malfunzionamenti di un'applicazione software è da imputare non ad errori di realizzazione, quanto a mancanze nelle specifiche dei requisiti dell'applicazione.

b) Per i progetti non software si utilizzano moduli collaudati, il cui corretto funzionamento è stato verificato in passato.

L'hardware (inteso in senso generale) viene sempre prodotto in serie, ed i componenti standard sono utilizzati in molte applicazioni. Questo permette di accogliere dati sul suo funzionamento (e naturalmente di correggere i difetti riscontrati).

Un'applicazione software, al contrario, viene quasi sempre costruita specificatamente per il sistema da controllare.

Risposte parziali a questo problema possono essere:

1. Riusabilità del software (concetto su cui contano molto tutte le tecniche object oriented).
2. Utilizzo di piattaforme standard per le applicazioni di controllo di processo (SCADA), che vengono solo personalizzate per l'applicazione specifica.
3. L'utilizzo di un modello metodologico di riferimento SPICE (Software Process Improvement Capability and dEtermination) ISO/IEC 15504, utile per finalità di capacità di miglioramento e determinazione del processo software.

c) Il collaudo rileva errori di progetto.

Si assume sempre che durante la fase di collaudo si possa esercitare il sistema realizzato e verificarne le caratteristiche, ed in particolare la sua affidabilità.

Nel caso di un'applicazione software, sempre a causa della sua elevata complessità, un test esaustivo del suo comportamento è praticamente impossibile. Infatti abbiamo detto che da un punto di vista matematico un'applicazione software è un sistema discreto con moltissimi stati e moltissime transizioni da uno stato all'altro. Verificarne il corretto funzionamento equivale ad esplorare tutti i suoi stati e le sue possibili transizioni. Tuttavia tale automa oltre ad essere enormemente complesso, non presenta alcuna struttura

regolare (un circuito elettronico ha anch'esso moltissimi stati, ma possiede anche una struttura regolare che ne permette sia un'analisi teorica che un testing sistematico), che ne possa semplificare o automatizzare l'analisi, e pertanto una sua verifica esaustiva è sempre irrealizzabile dal punto di vista pratico.

Un altro limite della fase di test riguarda gli errori fatti a livello di definizione delle specifiche. Infatti un test serve a verificare che il sistema si comporti come descritto nelle sue specifiche. Se però le specifiche sono scorrette, il test non potrà certo risolvere il problema!

Per finire bisogna notare che, per sistemi "safety critical", il test in condizioni realistiche è impossibile (pensate al software che controlla l'assetto di un aereo da combattimento). E' necessario ricorrere a dei simulatori, la cui fedeltà all'ambiente operativo reale non può essere garantita correttamente.

Da quanto esposto si comprende come le tecniche affidabilistiche per il software siano alquanto specifiche e debbano far fronte a problemi solitamente secondari in altre discipline.

Occorre inoltre tenere in considerazione che l'avvento dell'elettronica e dell'informatica ha portato i sistemi automatici ad un grado di flessibilità molto elevato, inimmaginabile nella precedente era meccanica. Tale evoluzione ha determinato un notevole aumento del grado di libertà dei progettisti: poiché gli errori progettuali sono molto più correggibili, la creatività del progettista è molto più libera di indirizzarsi agli aspetti concettuali, e ci si può permettere sempre di più il lusso di progettare il sistema in astratto, prescindendo dai tecnicismi e dai dettagli, che si confida possano essere poi risolti a livello procedurale, applicando sistematicamente le metodologie di progettazione affidabilistica e di qualità.

Possiamo pertanto definire l'affidabilità di un sistema software come segue:

"L'affidabilità è una misura della capacità di un sistema di comportarsi come stabilito dalle sue specifiche."

E' importante notare che le suddette specifiche, oltre ad essere complete, consistenti e non ambigue (qualità tutt'altro che scontate) devono anche definire i tempi di risposta del sistema ai vari eventi.

4.0 CONCLUSIONI

Il presente studio ha inteso promuovere e relazionare sulle tematiche di sicurezza e affidabilità nei controlli di produzione degli impianti energetici presentando uno scenario applicato di progettazione e realizzazione di un sistema di manutenzione predittiva.

Il documento ha voluto dare delle linee guida e dei principi progettuali che hanno costituito la base del progetto AVIS, che ha visto concretizzare la cultura della sicurezza e dell'affidabilità nell'utilizzo e nella gestione delle fonti energetiche non tradizionali.

Il sistema AVIS è oggi installato sul 70% degli impianti produttivi energetici IGCC nazionali e rappresenta un primato tutto italiano; prima e unica applicazione a livello mondiale nel settore delle fonti energetiche alternative, che ha saputo conquistare il mercato nei primi quattro mesi di promozione del sistema, con le sue caratteristiche di progetto e di innovazione ad alto valore qualitativo.