



Ricerca di Sistema elettrico

## Realizzazione dei componenti per la composizione delle prime sei casse di contenimento dei moduli del magnete toroidale di JT-60SA

Paolo Rossi, Antonio Cucchiaro

REALIZZAZIONE DEI COMPONENTI PER LA COMPOSIZIONE DELLE PRIME SEI CASSE DI CONTENIMENTO DEI  
MODULI DEL MAGNETE TOROIDALE DI JT-60SA

Paolo Rossi (ENEA), Antonio Cucchiaro (ENEA)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Produzione di Energia Elettrica e Protezione dell'Ambiente

Progetto: B.3.2 Attività di fisica della Fusione complementari a ITER

Obiettivo: A2

Responsabile del Progetto: Ing. Aldo Pizzuto, ENEA

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	6
2.1 ATTIVITÀ SVOLTE.....	6
2.2 MONITORAGGIO ATTIVITÀ.....	16
2.3 DOCUMENTI PRODOTTI.....	17
2.4 DIFFUSIONE DEI RISULTATI.....	17
3 CONCLUSIONI.....	17
4 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	17

## Sommario

L'ENEA è impegnata nella costruzione, collaudo e spedizione a Naka del magnete toroidale della macchina Tokamak JT-60SA e di parte dei sistemi di alimentazione elettrica.

Delle 18 bobine toroidali che costituiscono il magnete, 9 saranno realizzate dall'ENEA e 9 dal CEA Francese.

L'ENEA è responsabile della fornitura *in kind* delle casse di contenimento per tutte le 18 bobine costituite da componenti in acciaio austenitico. Il contratto di fornitura delle casse di contenimento delle 18 bobine è stato affidato alla ditta Walter Tosto.

Il presente documento riporta lo stato delle attività contrattuali relative alla manifattura delle casse di contenimento di JT-60SA.

## 1 Introduzione

Europa, Cina, Corea del Sud, India, Giappone, Federazione Russa e Stati Uniti hanno riunito i loro sforzi nel progetto ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) in costruzione a Cadarache in Francia. A margine dei negoziati per decidere il sito di ITER, Europa e Giappone hanno ratificato un accordo di collaborazione denominato "Broader Approach" (BA).

L'accordo, al quale l'Italia ha aderito, consiste in una serie di attività sia di fisica che di tecnologia che prevedono realizzazioni prototipiche di alto contenuto tecnologico e, tra gli altri, la realizzazione di un tokamak denominato JT60-SA, che sarà installato a Naka in Giappone.

Per finanziare l'accordo, Francia, Italia, Spagna, Germania e Belgio hanno offerto dei contributi finanziari per forniture 'in kind'. L'ENEA è impegnato nella costruzione del Magnete Toroidale della Macchina Tokamak JT-60SA e di parte dei sistemi di alimentazione elettrica.

Delle 18 bobine toroidali che costituiscono il magnete, 9 saranno realizzate dall'ENEA e 9 dal CEA Francese. L'ENEA è responsabile della fornitura in kind di:

- Nove delle 18 bobine di NbTi che costituiscono l'intero magnete;
- Le casse di contenimento per tutte le 18 bobine costituite da componenti in acciaio austenitico;
- Le alimentazioni elettriche per un totale di 8 alimentatori ad alta tensione e corrente con relativi interruttori e trasformatori più quattro sistemi di interruzione della corrente continua.

I contratti per la realizzazione delle bobine sono stati affidati rispettivamente da ENEA ad ASG Superconductors e dal CEA ad Alstom, mentre il contratto di fornitura delle casse di contenimento delle 18 bobine è stato affidato alla ditta Walter Tosto ed è partito il giorno 12/7/2012.

Nel corso del 2012 sono state completate le attività di progettazione di massima dei componenti delle casse, la realizzazione dei mock-ups rappresentativi dei componenti principali delle casse e l'ordine del materiale di costruzione delle 18 casse di contenimento.

Nel corso del 2013 sono state completate le attività di progettazione di dettaglio e la qualifica dei processi speciali. Durante le lavorazioni meccaniche è emerso che il materiale forgiato, ancorché rispondente alle specifiche di acquisto preparate da Fusion for Energy (F4E), ha evidenziato un comportamento fragile a bassa temperatura, non compatibile con il suo utilizzo alla temperatura operativa della macchina. F4E si è impegnata a sostituire il materiale forgiato con una nuova fornitura a partire dal 16 Maggio 2014. Le attività costruttive in WTO sono state rimodulate sulla base del programma di consegna del nuovo materiale forgiato completando nel corso del 2014 la produzione dei componenti meccanici costituiti da laminati.

In questo documento si riporta lo stato delle attività realizzate nel corso del PAR2014.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 Attività svolte

Obiettivo del subtask a.2 nell'ambito del PAR 2014 era il completamento di 6 set di componenti per la composizione delle casse di contenimento delle bobine toroidali di JT-60SA (chiamate casse o casing), 3 set destinati ad ASG Superconductors (Genova, Italia) e gli altri tre set destinati ad ALSTOM (Belfort, Francia).

Ciascuna cassa a forma di D è composta da un numero limitato di componenti per minimizzare le saldature necessarie alla chiusura finale dell'avvolgimento della bobina all'interno della cassa di contenimento.

La cassa è costituita principalmente da una gamba dritta, una gamba curva e da tre coperchi per il contenimento della bobina (denominati anche cover).

La gamba curva è composta da due ali ed un'anima centrale con una curvatura a forma di "D". Ulteriori supporti sono saldati con processo TIG o ad elettrodo.

La gamba dritta è composta da un tratto dritto e due curve saldate alle estremità denominate "gomiti"; al suo interno è installato il tubo di raffreddamento chiamato "Cooling Channel". I gomiti della gamba dritta sono realizzati attraverso la lavorazione di un blocco forgiato dal quale si ricavano 2 semicurve che poi vengono saldate entrambe ad un'anima centrale composta da lamiera per formare il "gomito". Le saldature principali delle ali all'anima sono in EBW (Electron Beam Welding) mentre la gamba dritta viene saldata alle curve per mezzo di una saldatura NGTIG (Tig Narrow Gap). La gamba dritta, a sua volta, è costituita da una parte centrale in materiale laminato e da due elementi a forma di gomito saldati alle sue estremità realizzati con materiale forgiato.

Il ciclo completo di produzione è schematizzato in Figura 1, dove, oltre quanto già descritto sono anche rappresentate le successive fasi di lavorazioni meccaniche di sgrossatura, finitura cianfratura ed i controlli di accettazione come i controlli dimensionali, il leak test ed il pressure test eseguiti sul circuito di raffreddamento dell'elio.

La prima gamba dritta (Figura 22) è stata composta saldando alle due estremità della parte dritta della gamba dritta i due gomiti realizzati con il nuovo materiale forgiato (Figura 3). La gamba dritta è stata poi lavorata fino all'ottenimento della geometria finale rimuovendo il sovrametallo (Figura 2) per poi procedere alla saldatura del circuito di raffreddamento (Figura 3) e successiva lavorazione dei cianfrini di saldatura trasversale e longitudinale.

Parallelamente la prima gamba curva completa dei supporti esterni (Figura 4) è stata anch'essa lavorata per step successivi fino all'ottenimento della geometria finale e poi cianfrinata.

Al completamento delle principali fasi di saldatura sono stati effettuati dei cicli di rilassamento delle tensioni residue per vibrazioni (Figura 5).

Le cover, ottenute per taglio da lamiera e successiva calandratura sono state assemblate per mezzo di attrezzature dedicate (Figura 6) che sono state poi utilizzate per l'ancoraggio delle stesse durante la lavorazione meccanica dei cianfrini di accoppiamento con le gambe.

In occasione del completamento del primo componente, gli impianti della Walter Tosto sono stati visitati il 9/3/2015 dal project leader di JT-60SA, H. Shirai, accompagnato dalla delegazione giapponese (Figura 7) e il 10/3/2015 dalle delegazioni del CEA ed ALSTOM (Figura 8) accompagnati dai rappresentanti dell'ENEA e di F4E.

Si è arrivati così al completamento ed alla consegna ad ALSTOM del primo set di componenti per la cassa di contenimento, che è stato inserito immediatamente nel ciclo di inserimento della bobina (Figura 9).

Inoltre sono state perfezionate le procedure per il controllo dimensionale, basato su Laser-tracker e software dedicato (Spatial Analyzer) sia durante gli step di lavorazione intermedi dei componenti meccanici sia per i controlli di accettazione finali (Figura 10). Parte dei test di accettazione finali sono stati anche i pressure test (elio a 2.5 MPa per 1h) e leak test (leak rate a 2.5 MPa) limite di accettazione  $10^{-8}$  Pa·m<sup>3</sup>/s), eseguiti in presenza di una Terza Parte, per la verifica della tenuta del tubicino per il raffreddamento con elio liquido (Figura 11). Prima delle spedizioni sono stati effettuati anche controlli della rugosità superficiale (Figura 12) e controlli delle sezioni delle gambe utilizzando dime dedicate (Figura 13).

In fase di preparazione per le prime consegne ad ALSTOM ed ASG è stato necessario perfezionare e concordare con tutte le parti F4E, CEA, ASG ed ALSTOM le procedure di carico, trasporto e scarico dei componenti. Tali procedure, prevedono particolari strutture di trasporto per i vari componenti dei casing (visibili in Figura 14 ed in Figura 18) che sono state progettate e realizzate da Walter Tosto secondo i criteri stabiliti dalle normative europee vigenti (comprehensive di marcatura CE).

In parallelo le attività produttive relative ai componenti per la composizione di più casing procedevano in parallelo su più stazioni con l'obiettivo di portare tutti i componenti al progressivo completamento ed alla successiva consegna ad ASG ed ALSTOM.

Il secondo casing è stato completato a maggio 2015 e consegnato ad ASG (Figura 14) ed è stato anch'esso utilizzato immediatamente per le operazioni di inserimento della bobina (Figura 15).

In giugno 2015 è stata organizzata anche un visita presso Walter Tosto di una delegazione di ASG Superconductors (Figura 16) per un confronto sulle caratteristiche delle principali saldature dei componenti meccanici e sulle configurazioni geometriche dei cianfrini dei coperchi.

Il terzo ed il quarto casing sono stati completati e consegnati rispettivamente ad ASG in luglio 2015 (Figura 17) e ad ALSTOM in agosto 2015 (Figura 18).

Il quinto ed il sesto casing, rispettivamente destinati ad ASG e ad ALSTOM sono stati completati in settembre 2015 (Figura 19).

Le principali dimensioni delle gambe dritte e gambe curve sono risultate in tolleranza:

- geometria del canale, planarità parallelismo e perpendicolarità delle superfici interne;
- geometria dei cianfrini trasversali e longitudinali;
- la corda, intesa come apertura della gamba dritta e della gamba curva per l'accoppiamento finale.

Le non conformità di tipo dimensionale e geometrico sono state valutate *minori* non avendo impatto sull'utilizzo dei componenti. Le principali non conformità sono relative a sovrametallo sui supporti da rimuovere comunque in fase di integrazione finale e sovrametallo sulla base delle gambe.

Anche le principali dimensioni e geometrie delle cover realizzate sono risultate in tolleranza ed anche per le cover sono state riscontrate non conformità minori risolte con l'intervento della ditta e la collaborazione degli utenti finali (ASG ed ALSTOM).



I leak test sono risultati tutti soddisfacenti così come i controlli di rugosità.

Il risultato ottenuto è stato il completamento dei primi sei casing di contenimento delle bobine toroidali di JT-60SA, dei diciotto previsti in totale; ulteriori 6 casing sono in fase di composizione e/o lavorazione meccanica ed entro la fine del 2015 è previsto il completamento e la consegna del 7° e dell'8° casing rispettivamente ad ASG e ALSTOM.

In Figura 20 è riportato lo stato delle attività relativo al termine del PAR 2014.

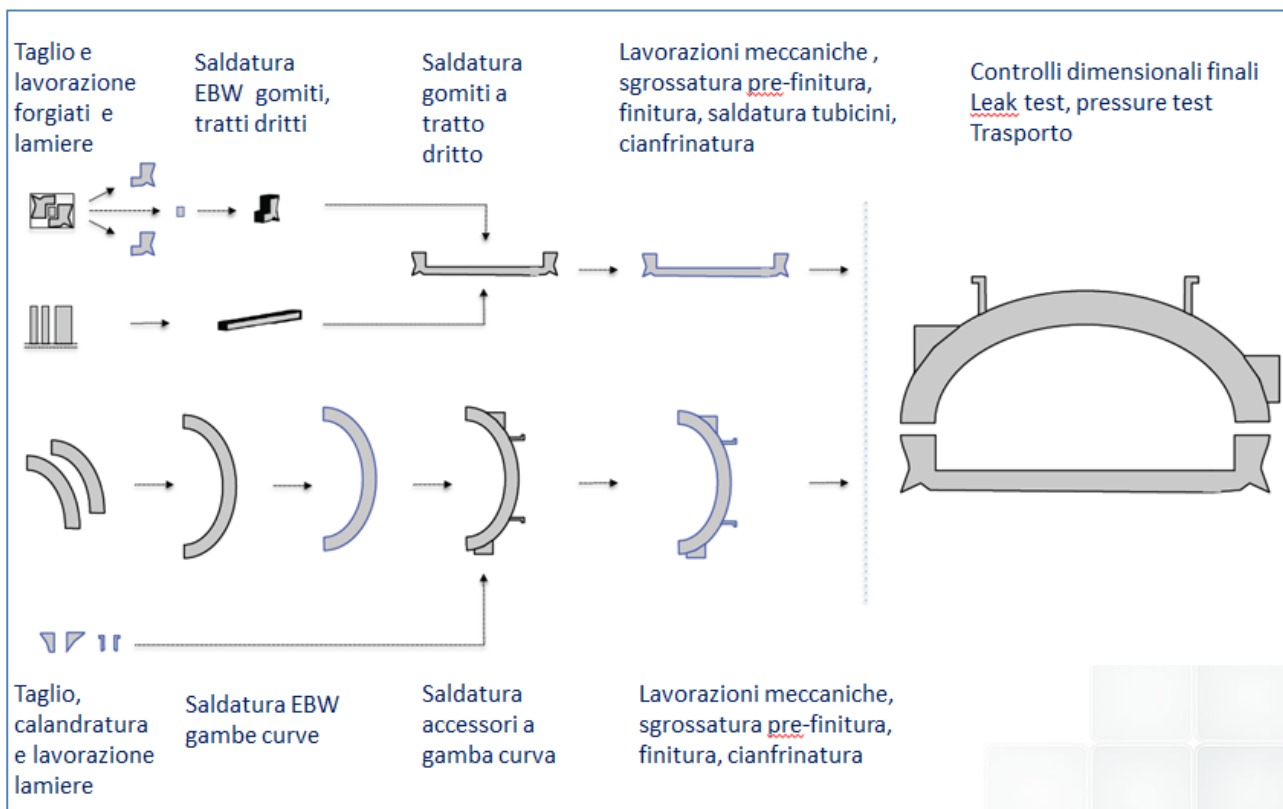


Figura 1: Ciclo di produzione delle casce di contenimento delle bobine toroidali di JT-60SA.



Figura 2: Attrezzatura di montaggio della gamba dritta in fase di saldatura traversa dei gomiti sulla parte dritta.





Figura 3: Taglio, composizione, saldatura e lavorazione dei gomiti della gamba dritta.



Figura 2: Lavorazione meccanica della gamba dritta.

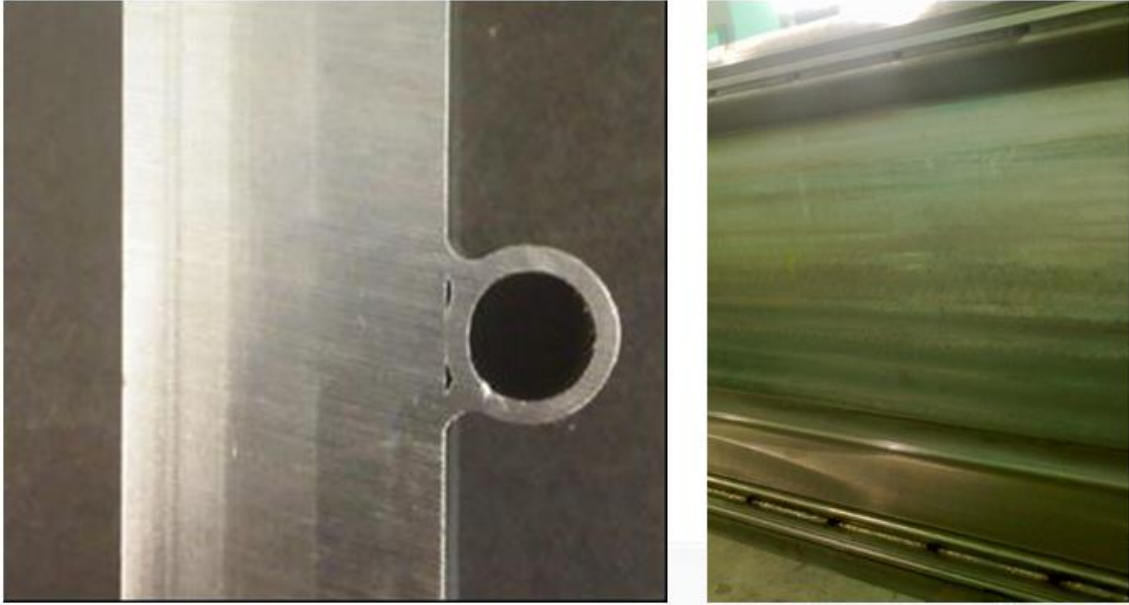


Figura 3: Saldatura del tubicino di raffreddamento sulla gamba dritta.



Figura 4: Attrezzature per la composizione della gamba curva e saldatura dei supporti.

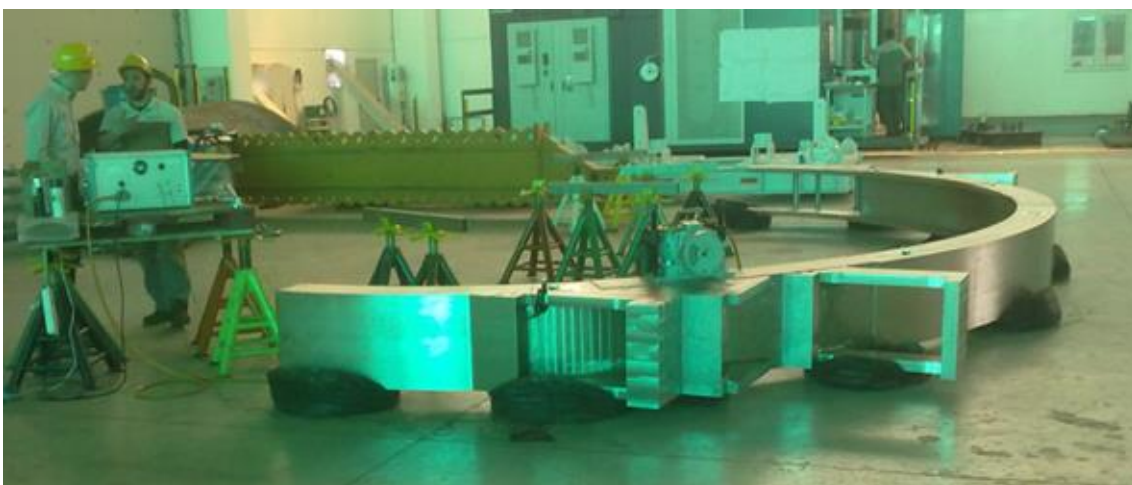


Figura 5: Vibration stress relief (VSR) sulla gamba curva.





Figura 6: Attrezzatura di montaggio delle cover.



Figura 7: Visita del Project leader di JT60SA e della delegazione JAEA in Walter Tosto, 9/3/2015.



Figura 8: Visita della delegazione F4E, CEA, ALSTOM, 10/3/2015



Figura 9: Inserimento bobina nel primo casing (ALSTOM-A) in ALSTOM, maggio 2015 (Courtesy of ALSTOM).





**Figura 10: Controlli dimensionali con sistemi laser tracker.**



**Figura 11: Pressure test e leak test.**



**Figura 12: Controlli di rugosità**



**Figura 13: Dime di controllo**



Figura 14: Gamba dritta e gamba curva del 2° casing consegnato, il primo ad ASG (ASG-A)



Figura 15: Gamba dritta e gamba curva del 2° casing in fase di assemblaggio in ASG (ASG-A)( Courtesy of ASG).





Figura 16: Visita della delegazione di ASG Superconductors, 10/06/2015.



Figura 17: Gamba dritta e gamba curva del 3° casing consegnato, il secondo per ASG (ASG-B).



Figura 18: Gamba dritta, gamba curva e cover del 4° casing consegnato, il secondo ad ALSTOM (ALSTOM-B)





Figura 19 Gamba curva del 5 casing (ASG-C, in fase di rifinitura) e gamba dritta del 6 casing (ALSTOM-C, in fase di misura).

COIL CASING	CURVED LEG				STRAIGHT LEG						COVERS	SET
	CUT/ROLL/ TIG WELD	FIT-UP/ EB WELD	Accessories	MACHINING/CH AMFERING	STRAIGHT PART		ELBOWS		FIT_UP/ TIG WELD	MACHINING/CH AMFERING		
					CUT/FIT UP	EB WELD	CUT	FIT UP/ EB WELD				
1° COIL CASING SET- CS10 (ALSTOM-A)	done	done	JTAL4006-A	JTAL4006-A	done	JTAL4001-A	done	done	JTAL4010-A	JTAL4010-A	done	4/2015
2° COIL CASING SET- CS1 (ASG-A)	done	done	JTAL4006-A	JTAS4006-A	done	JTAS4001-A	done	done	JTAS4010-A	JTAS4010-A	done	5/2015
3° COIL CASING SET- CS2 (ASG-B)	done	done	JTAS4006-B	JTAS4006-B	done	JTAS4001-B	done	done	JTAS4010-B	JTAS4010-B	done	6/2015
4° COIL CASING SET- CS11 (ALSTOM-B)	done	done	JTAL4006-B	JTAL4006-B	done	JTAL4001-A	done	done	JTAL4010-B	JTAL4010-B	done	8/2015
5° COIL CASING SET- CS3 (ASG-C)	done	done	JTAS4006-C	JTAS4006-C	done	JTAS4001-C	done	done	JTAS4010-C	JTAS4010-C	done	9/2015
6° COIL CASING SET- CS12 (ALSTOM-C)	done	done	JTAL4006-C	JTAL4006-C	done	JTAL4001-C	done	done	JTAL4010-C	JTAL4010-C	done	9/2015
7° COIL CASING SET- CS4 (ASG_D)	done	done	on-going	JTAS4006-D	done	JTAS4001-D	done	done		JTAS4010-D	cut	2015
8° COIL CASING SET- CS13 (ALSTOM_D)	done	done	on-going	JTAL4006-D	done	JTAL4001-D	done	done		JTAL4010-D	cut	
9° COIL CASING SET- CS5 (ASG-E)	done	on-going		JTAS4006-E	done	JTAS4001-E	done	on-going		JTAS4010-E	cut	
10° COIL CASING SET- CS14 (ALSTOM-E)	done	on-going		JTAL4006-E	done	JTAL4001-E	done	on-going		JTAL4010-E	cut	
11° COIL CASING SET- CS6 (ASG-F)	done				done	JTAS4001-F	on-going				cut	
12° COIL CASING SET- CS15 (ALSTOM-F)	done				done	JTAL4001-F	on-going				cut	
13° COIL CASING SET- CS7 (ASG-G)	done				done	JTAS4001-G					cut	
14° COIL CASING SET- CS16 (ALSTOM_G)	done				done	JTAL4001-G					cut	
15° COIL CASING SET- CS8 (ASG-H)	done				done	JTAS4001-H					cut	
16° COIL CASING SET- CS17 (ALSTOM-H)	done				done	JTAL4001-H					cut	
17° COIL CASING SET- CS9 (ASG-I)	done				done	JTAS4001-I					cut	
18° COIL CASING SET- CS18 (ALSTOM-I)	done				done	JTAL4001-I					cut	

Figura 20: Stato delle attività

## 2.2 Monitoraggio attività

ENEA ha monitorato le attività della ditta Walter Tosto con contatti quotidiani in teleconferenza e/o in videoconferenza. ENEA ha inoltre organizzato incontri con frequenza bisettimanale presso gli stabilimenti di produzione della ditta. In alcune occasioni hanno partecipato direttamente gli altri partner internazionali del progetto JT-60SA. In particolare si sono tenuti i seguenti Progress Meeting:

- 9/3/2015, visita del Project Leader del programma JT-60SA, di una delegazione dell’associazione giapponese JAEA e di una delegazione di F4E accompagnati dai responsabili ENEA;
- 10/3/2015, visita delle delegazioni ALSTOM, CEA e F4E accompagnati dai responsabili ENEA;
- 10/6/2015, visita della delegazione di ASG Superconductors accompagnata dai responsabili ENEA.

## 2.3 Documenti prodotti

Si riporta di seguito l'elenco dei principali documenti prodotti da ENEA:

( 1 ) Deviation notice n.4 (doc. DN-JT60CC-04)

( 2 ) Deviation notice n.5 (doc. DN-JT60CC-05)

Si riporta di seguito un elenco dei principali documenti prodotti dalla ditta:

( 3 ) ADP-JT60CC-01 (MDB-12110.01-01)

( 4 ) ADP-JT60CC-02 (MDB-12110.01-02)

( 5 ) ADP-JT60CC-03 (MDB-12110.01-03 )

( 6 ) ADP-JT60CC-10 (MDB-12110.01-01 )

( 7 ) ADP-JT60CC-11 (MDB-12110.02-02)

( 8 ) ADP-JT60CC-12 (MDB-12110.02-03)

Tutti i documenti sono conservati nell'archivio interno ENEA delle attività relative a JT-60SA ([https://www.afs.enea.it/project/archivio\\_jt60sa/](https://www.afs.enea.it/project/archivio_jt60sa/)):

## 2.4 Diffusione dei risultati

La diffusione dei risultati delle attività è stata effettuata con frequenza settimanale presso le altre associazioni europee (F4E, CEA) impegnate nel progetto JT-60SA attraverso la presentazione di resoconti dettagliati delle attività in corso.

La presentazione delle attività è stata effettuata in ambito internazionale nei Technical Coordination Meeting (TCM), incontri tra tutti i partecipanti al progetto JT-60SA, tra cui le associazioni giapponesi (JAEA) ed europee. In particolare nel periodo di riferimento i TCM si sono tenuti:

- Saclay, Francia, 12-13 novembre 2014
- Naka, Giappone 22-23 aprile 2015
- Genova, Italia, 29-30 settembre 2015

Lo stato delle attività relativo alla realizzazione delle casse di contenimento dei magneti toroidali è stato presentato in occasione del seguente seminario dedicati alla ingegneria e costruzione della macchina tokamak JT-60SA e tenuti presso il CR ENEA di Frascati:

“Le attività della Ricerca di Sistema Elettrico sulle “Attività di Fisica della Fusione complementari ad ITER”  
Aldo Pizzuto, Antonio Cucchiario, Gian Mario Polli, Paolo Rossi, Alessandro Lampasi, Pietro Zito  
ENEA Sede Legale - Via Giulio Romano, 41 - Roma 19 luglio 2015, 9.30-13.00,

## 3 Conclusioni

Obiettivo del subtask a.2 nell'ambito del PAR 2014 era il completamento di 6 strutture di contenimento delle bobine toroidali di JT-60SA (chiamate casse o casing), 3 delle quali destinate ad ASG Superconductors (Genova, Italia) e le altre tre destinate ad ALSTOM (Belfort, Francia).

Il risultato ottenuto è stato il completamento dei primi sei casing di contenimento delle bobine toroidali di JT-60SA, dei diciotto previsti in totale; ulteriori 6 casing sono in fase di composizione e/o lavorazione meccanica ed entro la fine del 2015 è previsto il completamento e la consegna del 7° e dell'8° casing rispettivamente ad ASG e ALSTOM.

La produzione ha quindi rispettato il programma di realizzazione di 6 casse, si prevede inoltre il completamento delle 18 casse entro il primo semestre del 2017.

## 4 Abbreviazioni ed acronimi

BA	Broader Approach
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
F4E	Fusion for Energy
JAEA	Japan Atomic Energy Agency

WT Walter Tosto  
TF Toroidal Field